



Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

**PROYECTO FIN
DE CARRERA**

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO MECÁNICO DE SISTEMAS DE TUBERÍAS

Autor: Daniel Abarrategui Herguedas

Tutor: Juan Carlos García Prada

Madrid, 28 Mayo de 2014



Título: Optimización del proceso de diseño mecánico de sistemas de tuberías

Autor: Daniel Abarrategui Herguedas

Director: Juan Carlos García Prada

EL TRIBUNAL

Presidente: Cristina Castejón

Vocal: Luis Moreno

Secretario: Alejandro Bustos

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 28 de Mayo de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin la gran ayuda de mi tutor Juan Carlos García Prada, que a pesar de su apretada agenda ha resuelto de forma eficiente y rápida dudas y cuestiones que han aparecido durante el periodo de desarrollo. También tengo que agradecer a toda la gente que me ha aguantado y apoyado todo este tiempo, ha sido muy duro y no lo hubiese conseguido sin vuestro apoyo. Especialmente he de mencionar a mi familia y a mi pareja, así como algunos compañeros de trabajo que me han aconsejado y ayudado con todas aquellas cuestiones que no dominaba. Gracias por todo!





Índice general

Lista de Figuras y tablas	6
1. Introducción	9
1.1. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE TUBERIAS	9
1.2. Objetivo del proyecto	10
1.3. estructura y visualizacion del problema	11
2. Organización y comunicación entre departamentos	13
2.1. AREA DE INGENIERÍA	15
2.2. Departamento de tuberías.....	16
3. Fundamentos del análisis de flexibilidad	19
3.1. Revisión de conceptos de mecánica de materiales	20
3.1.1. Propiedades de los materiales	20
3.1.2. Teoría de fallas	22
3.2. Clasificación de tensiones a las que esta sometido un sistema de tuberías ...	24
3.2.1. Tensiones producidas por presión interna	26
3.2.2. Tensiones producidas por fuerzas y momentos	27
3.2.3. Tipos de esfuerzos a analizar	29
3.3. funciones del análisis de flexibilidad.....	35
3.4. Códigos y normas	39
3.4.1. Códigos internacionales	39
3.4.2. Códigos y normativas locales.....	39
3.4.3. Especificaciones propias del proyecto.....	40
4. Los soportes de tuberías	41
4.1. Tipos de soportes	42
4.1.1. Soportes estructurales	42
4.1.2. Soportes para control de desplazamiento	43
4.1.3. Soporte para protección del apoyo	43
4.1.4. Soportes elásticos.....	44
4.1.5. Otros elementos de soportación	45
5. Propuesta de optimización del proceso de diseño	46
5.1. Proceso de diseño actual.....	47



5.2. Categorización de tuberías	49
5.2.1. Categoría I.....	49
5.2.2. Categoría II.....	50
5.2.3. Categoría III.....	50
5.2.4. Categoría IV	50
5.3. Proceso de diseño optimizado.....	52
6. Caso práctico: Labores del comité de validación.....	56
6.1. Análisis de una línea de interconexión entre intercambiadores de calor.	57
7. Conclusiones	83
8. Presupuesto	86
9. Referencias.....	88
10. Anexos	90

Lista de Figuras y tablas

Fig 1 Evolución temporal de carga de trabajo.....	14
Fig 2 Departamentos del área de ingeniería.....	15
Fig 3 Distribución de personal en el departamento de tuberías.....	17
Fig 4 Procedimiento de trabajo del departamento de tuberías	18
Fig 5 Comunicación entre departamentos.....	18
Fig 6 Diagrama de Tensión-Deformación	20
Fig 7 Tabla C-6 Asme B31.3	21
Fig 8 Fuerzas y momentos que actúan en el sistema.....	25
Fig 9 Tabla 304,1,1 ASME B31.3	27
Fig 10 Tensiones producidas por fuerzas	28
Fig 11 Tensiones producidas por momentos.....	28
Fig 12 Función del factor cíclico f	32
Fig 13 Representación de momentos en un plano de un codo a 90°.....	33
Fig 14 Representación de momentos en un plano de una tee reductora.....	34
Fig 15 Fuga en brida.....	36
Fig 16 Fallo por fatiga	36
Fig 17 Fallo de tobera por deformación	37
Fig 18 Desgaste prematuro	37
Fig 19 Descripción análisis de flexibilidad.....	38
Fig 20 Ejemplos de soportes estructurales.....	42
Fig 21 Ejemplos de soportes para el control de desplazamiento	43
Fig 22 Ejemplos de soportes para protección de apoyos.....	43



Fig 23 Ejemplos de soportes elásticos	44
Fig 24 Proceso de diseño actual.....	48
Fig 25 Ejemplo standard de categorización de líneas.....	51
Fig 26 Proceso de diseño optimizado	53
Fig 27 Plano isométrico 1 del caso a estudiar	58
Fig 28 Plano isométrico 2 del caso a estudiar	59
Fig 29 Plano isométrico 3 del caso a estudiar.....	59
Fig 30 Plano isométrico 4 del caso a estudiar	60
Fig 31 Condiciones de diseño de la línea	60
Fig 32 Información y propiedades de la línea	61
Fig 33 Especificación de materiales.....	61
Fig 34 Sistema a analizar en vista isométrica.....	62
Fig 35 Planta del sistema a analizar.....	62
Fig 36 Propiedades del acero A-106 B.....	63
Fig 37 Condiciones de diseño y operación.....	63
Fig 38 Sistema modelado en Caepipe por nodos.....	64
Fig 39 Sistema modelado en Caepipe	64
Fig 40 Soportado del sistema,caso1.....	65
Fig 41 Esfuerzos por cargas sostenidas y por expansión	66
Fig 42 Código de colores de esfuerzos	67
Fig 43 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas	68
Fig 44 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas-1	68
Fig 45 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica.....	69
Fig 46 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica-1.....	69
Fig 47 Desplazamientos en condiciones de operación	70
Fig 48 Desplazamientos en condiciones de operación-1	70
Fig 49 Sistema caepipe opción II.....	71
Fig 50 Código de colores sistema opción II	72
Fig 51 Esfuerzos por cargas sostenidas y por expansión opción II.....	72
Fig 52 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas opción II.....	73
Fig 53 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas opción II-1.....	73
Fig 54 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica opción II	74
Fig 55 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica opción II-1	74
Fig 56 Desplazamientos en condiciones de operación opción II.....	75
Fig 57 Desplazamientos en condiciones de operación opción II-1	75
Fig 58 Representación genérica de fuerzas y momentos en intercambiador de calor	76
Fig 59 Fuerzas máximas en toberas de depósitos e intercambiadores según especificación.....	77
Fig 60 Valor de K para calcular las fuerzas máximas	77
Fig 61 Identificación de las fuerzas de nuestro sistema.....	78
Fig 62 Fuerzas máximas admisibles	78
Fig 63 Fuerzas en toberas debidas a cargas sostenidas	79



Fig 64 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (Cargas sostenidas).....	79
Fig 65 Fuerzas en toberas debidas a expansión térmica	80
Fig 66 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (expansión).....	80
Fig 67 Fuerzas en toberas en operación.....	81
Fig 68 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (operación)	81
Fig 69 Categorización de líneas ejemplo	84



1. Introducción

1.1. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE TUBERIAS

Un sistema de tuberías es el medio de transporte de fluidos más efectivo y comúnmente utilizado en complejos industriales a nivel mundial y representa el principal sistema dentro de un complejo, debido a su impacto económico, horas de ingeniería y por ser el medio integrador entre los otros elementos de la industria.

Como ejemplo vamos a enumerar los recursos que en un complejo petroquímico recaen sobre el sistema de tuberías:

- Representa entre un 25-35% de todo el material del complejo
- Requiere entre el 30% y 40% de las horas de construcción y montaje
- Puede consumir hasta el 50% en horas de ingeniería

Sin embargo, a pesar de la importancia económica y de horas de trabajo que puede llegar a tener un sistema de tuberías, su importancia no recae en estos porcentajes. Los sistemas de tuberías son los principales responsables del funcionamiento de un complejo industrial, ya que cualquier fallo en uno de sus componentes puede provocar:

- Parada completa del complejo industrial
- Daños en el propio sistema de tuberías
- Daños en los equipos de conexión
- Pérdidas humanas



En el diseño de un sistema de tuberías intervienen diferentes disciplinas y un gran número de ingenieros, involucrando prácticamente a todos los departamentos que comportan el equipo de trabajo de un proyecto de ingeniería. Hablaremos en los sucesivos capítulos acerca de las diferentes disciplinas que participan en un proyecto, cómo se relacionan y las labores asignadas a cada grupo de trabajo. De dicha información obtendremos las claves para entender uno de los problemas básicos que se derivan de este tipo de proyectos: Falta de comunicación entre disciplinas.

1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es analizar e intentar solventar un problema que se produce en todo proyecto relacionado con plantas petroquímicas y que ocasiona numerosos retrasos y pérdidas económicas. Se trata de la insuficiente comunicación entre áreas, concretamente entre las áreas de “diseño” y “flexibilidad y soportes”. Para ello, se propone optimizar las tareas de diseño, flexibilidad y soportación de la implantación de plantas industriales. Para ello, y a partir de la experiencia obtenida en el planteamiento y solución de la problemática encontrada en numerosos casos reales, nos ha permitido proponer una metodología que intente optimizar, en lo posible, los siguientes aspectos:

- Excesivas revisiones de diseño de tuberías.
- Costes derivados de la compra de material basados en diseños erróneos
- Optimizar flujo de trabajo
- Reducir tiempos de ejecución



1.3. ESTRUCTURA Y VISUALIZACION DEL PROBLEMA

Hasta este punto se ha pretendido realizar una introducción del tema de estudio de este proyecto, pero para poder llegar al fondo de dicha problemática será necesario un entendimiento de la estructura de trabajo de un proyecto de este tipo.

En el capítulo 2 presentaremos y desarrollaremos un organigrama de trabajo en el cual presentaremos los departamentos implicados en un proyecto, así como sus diferentes funciones. También haremos alusión a la problemática global actual de este tipo de proyectos, ya que debido a la situación mundial actual se han producido una serie de cambios que afectan directamente al desarrollo de los mismos.

En el capítulo 3 se expondrá más en profundidad las tareas que realizan los miembros del grupo de flexibilidad, así como una serie de fundamentos teóricos necesarios para mejorar la comprensión y el seguimiento del proyecto. También explicaremos la problemática derivada de un incorrecto análisis de flexibilidad

En el capítulo 4 debemos hablar de la especialidad de soportes, encargada del diseño de soportes para conseguir las restricciones que el ingeniero responsable de realizar el análisis de flexibilidad indica en su estudio como necesarias para el buen funcionamiento de la línea y además para cumplir con la normativa vigente. También realizaremos una breve introducción a los tipos de soportes estándar, los cuales deben ser utilizados prioritariamente ya que al estar estandarizados suponen un ahorro considerable con respecto a soportes especiales.

En el capítulo 5 abordaremos la problemática existente actualmente y desarrollaremos nuestra propuesta de mejora. Para ello, estudiaremos como se trabaja ahora y propondremos un flujograma alternativo de trabajo con el que pretendemos mejorar y optimizar, en la medida de lo posible, todo el proceso de diseño de sistemas de tuberías.



En el capítulo 6 simularemos las labores a realizar por nuestro comité de validación aplicándolo a un caso práctico. Estudiaremos los casos de cargas sostenidas, dilataciones térmicas y operación. Con ello estaremos en disposición de validar o rechazar el diseño y proceder según sea el caso.

Por último presentaremos las conclusiones en el capítulo 7 y el presupuesto en el capítulo 8.



2. Organización y comunicación entre departamentos

Para poder facilitar la comprensión de cómo se llevan a cabo los proyectos de ingeniería basados en la construcción y puesta en marcha de plantas industriales, a continuación se explica la organización y funciones de los diferentes departamentos implicados. Es de vital importancia que además de cumplir con cada una de sus funciones, todos los departamentos implicados trabajen en equipo, teniendo en cuenta que ciertos departamentos dependen directamente de los datos proporcionados por un tercero.

En los últimos 10 años se ha producido un cambio drástico en la metodología de trabajo. Los clientes desean llevar a cabo sus proyectos en el menor tiempo posible, con la intención de obtener beneficios rápidamente. Esto ha provocado que uno de los factores clave a la hora de la realización de un proyecto sea precisamente el tiempo de ejecución y puesta en marcha de la planta. A continuación reflejaremos cómo ha cambiado la industria en los últimos años, haciendo uso de un dato imprescindible y que marca el ritmo de un proyecto:

- Isométricas: Se denominan “isométricas” a los planos que definen el recorrido de las tuberías, así como los materiales que utilizan, condiciones de diseño y operación (T^a y P)....

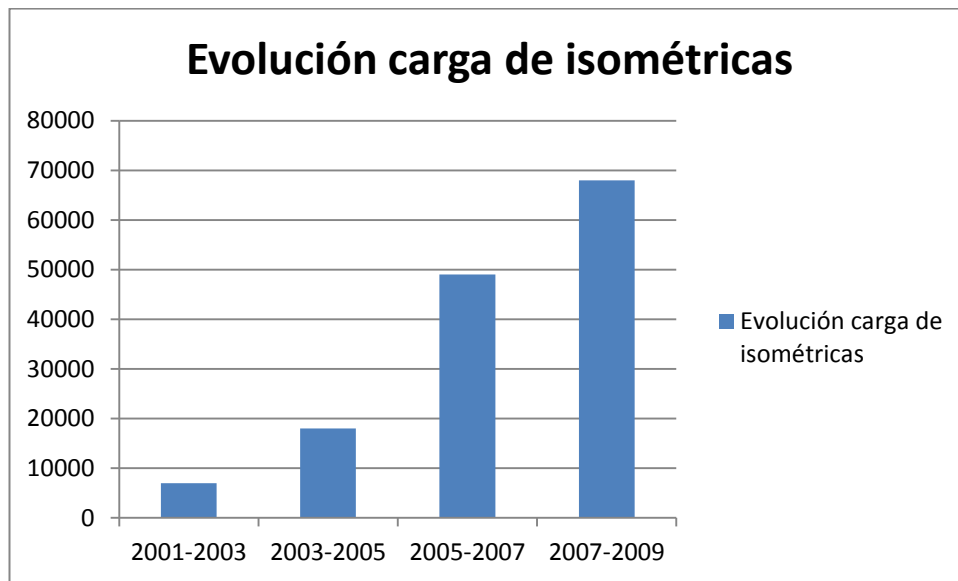


Fig 1 Evolución temporal de carga de trabajo

En vista de esta evolución, es imprescindible la optimización de las tareas a realizar con el objetivo de reducir retrasos. Existen una serie de cláusulas que penalizan el retraso en la entrega y puesta en marcha de una planta, las cuales se hacen cada vez más difícil de cumplir y provoca pérdidas económicas. Para abordar y poder entender donde se pueden realizar mejoras, a continuación realizaremos una breve descripción de los departamentos ingenieriles implicados en un proyecto. Una vez tengamos una visión general, podremos abordar a fondo el departamento objeto de este proyecto, el departamento de tuberías. Tuberías es uno de los pilares fundamentales de un proyecto, su carga de trabajo es superior a la de cualquier otro departamento. Un alto porcentaje pertenece al diseño de tuberías, así como garantizar su funcionamiento y operatividad según normativa.



2.1. AREA DE INGENIERÍA

Dentro del área de ingeniería, que es la analizada en este proyecto tenemos los siguientes departamentos:

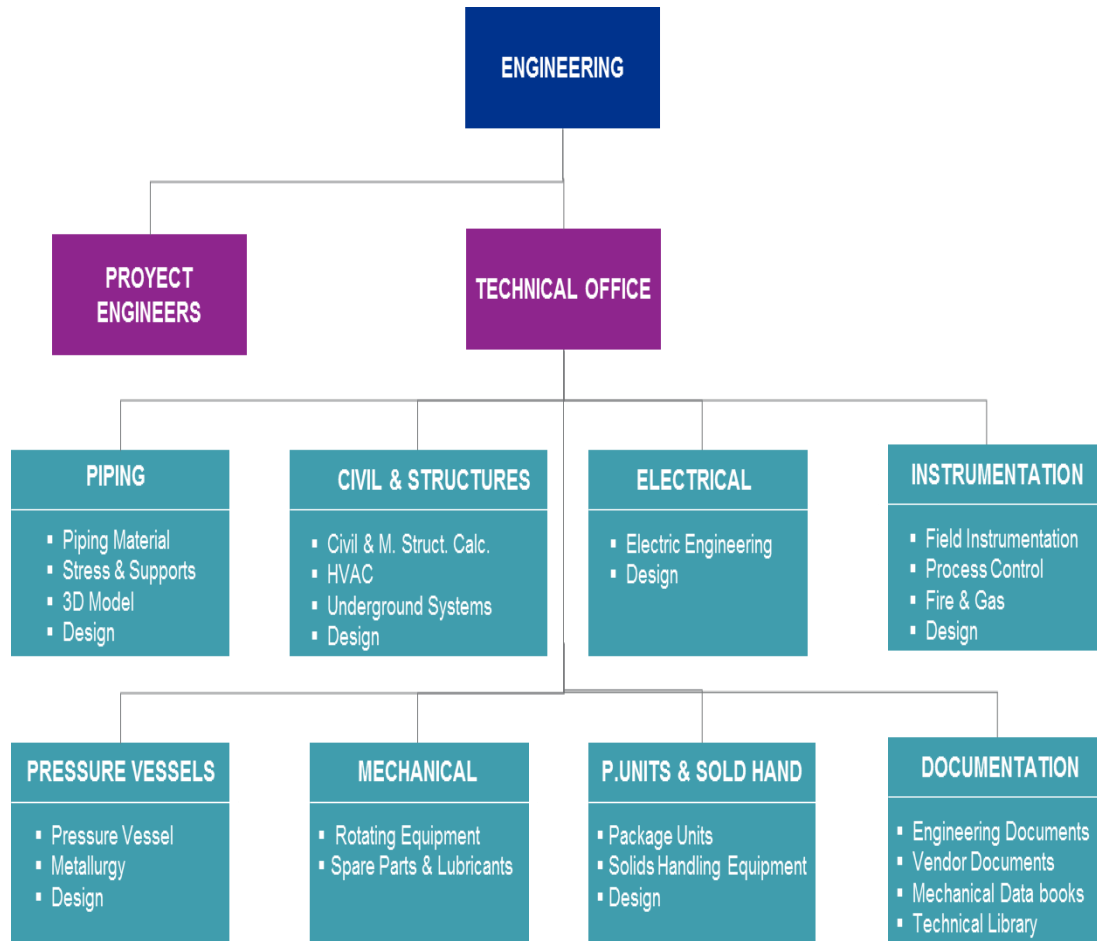


Fig 2 Departamentos del área de ingeniería

- Departamento de Piping: es el departamento encargado de la creación de las especificaciones de materiales, el desarrollo del modelo 3D que engloba: Modelado de equipos, estructuras preliminares, sistemas de tuberías, estudio y validación de esfuerzos y elección de soportes. También son los encargados de las especificaciones de stress y soportes, así como de la compra de material.
- Departamento de civil y estructuras: Encargado del cálculo de las estructuras correspondientes, tanto para equipos como las estructuras de los “rack” de tuberías. También deben diseñar los sistemas de ventilación (HVAC) así como los sistemas de tuberías enterradas (underground systems).
- Departamento de electricidad: Llevan a cabo el ruteado de las bandejas eléctricas que abastecen la instalación



- Departamento de instrumentación: Deben elegir y diseñar todos los sistemas de instrumentación necesarios para el correcto control de la planta: indicadores de temperatura, presión, medidores de flujo así como elementos especiales y de vital importancia como pueden ser las trampas de vapor, indicadores de nivel en tanques de almacenamiento...
- Departamento de calderería y recipientes a presión: Son los encargados de calcular los recipientes a presión y validar su diseño para cumplir con las condiciones necesarias para cada proceso en concreto. Son los encargados de transmitir a los fabricantes las necesidades a satisfacer así como verificar que todo cumple según norma.
- Departamento de mecánica: Se encargan de equipos rotatorios como pueden ser bombas y compresores a presión. Su labor es similar a la del departamento de calderería.
- Departamento de unidades paquete: Existen ciertos equipos, denominados unidades paquete, las cuales debido a su complejidad y al escaso margen de tiempo se subcontratan a otras empresas.

Una vez explicados los distintos departamentos y sus funciones, vamos a estudiar a fondo el departamento más importante y problemático de los enunciados anteriormente, el departamento de tuberías.

2.2. DEPARTAMENTO DE TUBERÍAS

El departamento de tuberías está dividido en tres áreas:

- Diseño: Encargados de la realización de los “plot plans” (planos de planta donde se indican la localización de todos los equipos así como la división de áreas de proceso). Realizan los planos isométricos del recorrido de los sistemas de tuberías y modelan los equipos según las hojas de dato proporcionadas por los departamentos de calderería y mecánica. También realizan el modelado de las estructuras preliminares que luego pasarán al departamento de civil para su diseño definitivo.
- Stress y soportes: Llevan a cabo las especificaciones correspondientes a stress y soportes. Realizan el análisis de flexibilidad a las líneas en función de su clasificación de criticidad. Realizan el soportado de las tuberías así como la conversión de los soportes teóricos a los estándares permitidos. Son los encargados de la adquisición de dichos soportes.

- **Materiales:** Realizan las especificaciones de materiales en función del tipo de fluido a transportar, su estado, presión, temperatura...Son los encargados de realizar el “recuento de materiales” (Material take off MTO), así como las compras de material.

La distribución de personal en las tres áreas anteriores puede variar en función de las necesidades específicas de cada proyecto, así como de la fase del proyecto en la que nos encontremos. Una distribución común, se podría representar de la siguiente manera:



Fig 3 Distribución de personal en el departamento de tuberías

Para terminar de visualizar el método de trabajo del departamento de tuberías mostramos a continuación un esquema que representa el proceso de trabajo dentro de nuestro departamento. Las tres áreas pertenecientes a tuberías trabajan en paralelo y dependen del avance de las demás áreas para poder desempeñar sus funciones, por lo que cualquier problema en alguna de las áreas afecta directamente a las demás, haciéndose necesario un alto grado de comunicación y trabajo en equipo entre ellas.

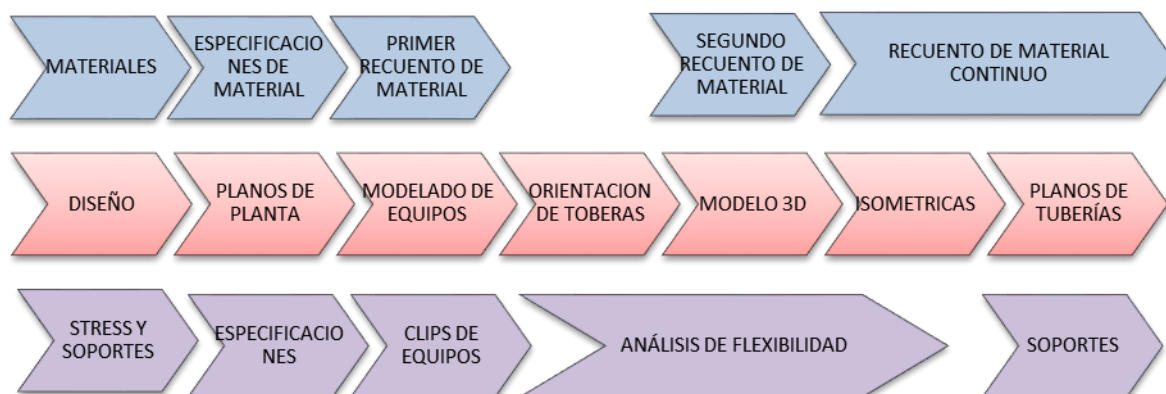


Fig 4 Procedimiento de trabajo del departamento de tuberías

Una vez abordado el proceso de trabajo dentro del departamento de tuberías, representaremos con que departamentos interactúan las tres áreas descritas anteriormente:

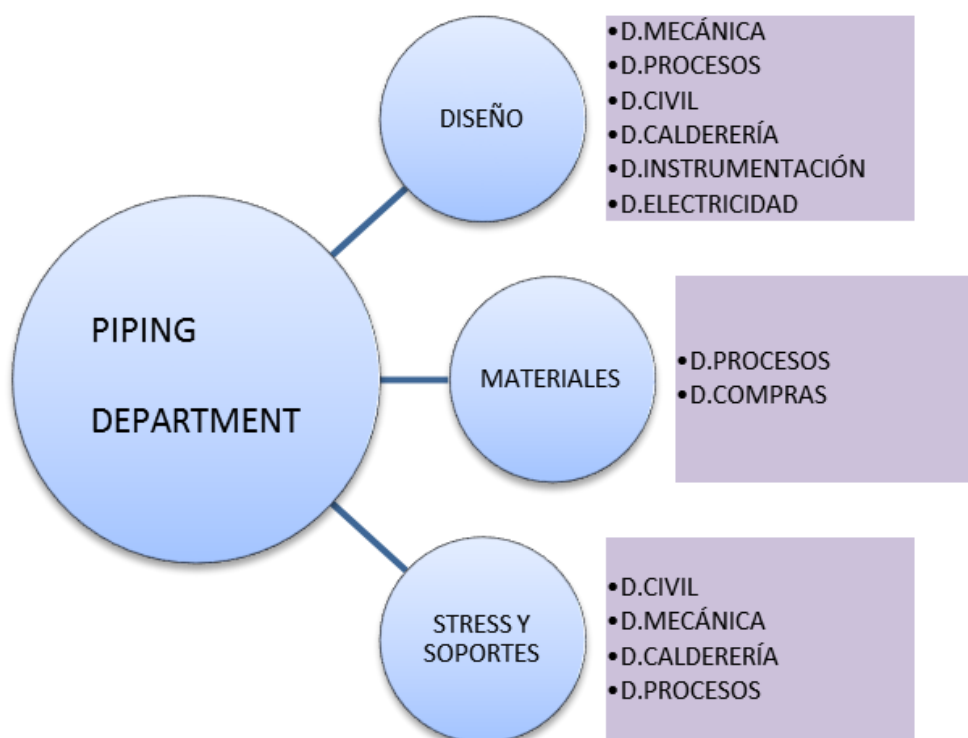


Fig 5 Comunicación entre departamentos



3. Fundamentos del análisis de flexibilidad

En el diseño de un sistema de tuberías intervienen diferentes disciplinas y un gran número de ingenieros, involucrando prácticamente a todos los departamentos que conforman el equipo de trabajo de un proyecto de ingeniería. El diseño y análisis de flexibilidad no es una labor individual o exclusiva del departamento de tuberías, es una labor interdisciplinaria que requiere de una gran cantidad de información y coordinación para que el resultado final sea un diseño viable, óptimo y seguro.

Los ingenieros del grupo de flexibilidad y soportes son los encargados de:

- Realizar el análisis de flexibilidad del sistema de tuberías
- Validar las cargas en los equipos de conexión
- Determinar los puntos de soportado necesario

El trazado inicial realizado por el grupo de diseño, donde no se suelen tener en cuenta ciertos aspectos relacionados con la flexibilidad del sistema, siempre deberá ser validado por el analista de flexibilidad. Una vez validado, entra en juego el grupo de soportes que son los encargados de materializar físicamente los puntos de soportado. La ubicación y tipos de soportes se incluyen en la isométrica final de construcción.

3.1. REVISIÓN DE CONCEPTOS DE MECÁNICA DE MATERIALES

A continuación se estudian algunos conceptos propios de la tecnología de materiales que son imprescindibles para comprender los fundamentos de un análisis de flexibilidad.

3.1.1. Propiedades de los materiales

La siguiente figura muestra la forma ideal de una curva de ensayo de esfuerzo-deformación.

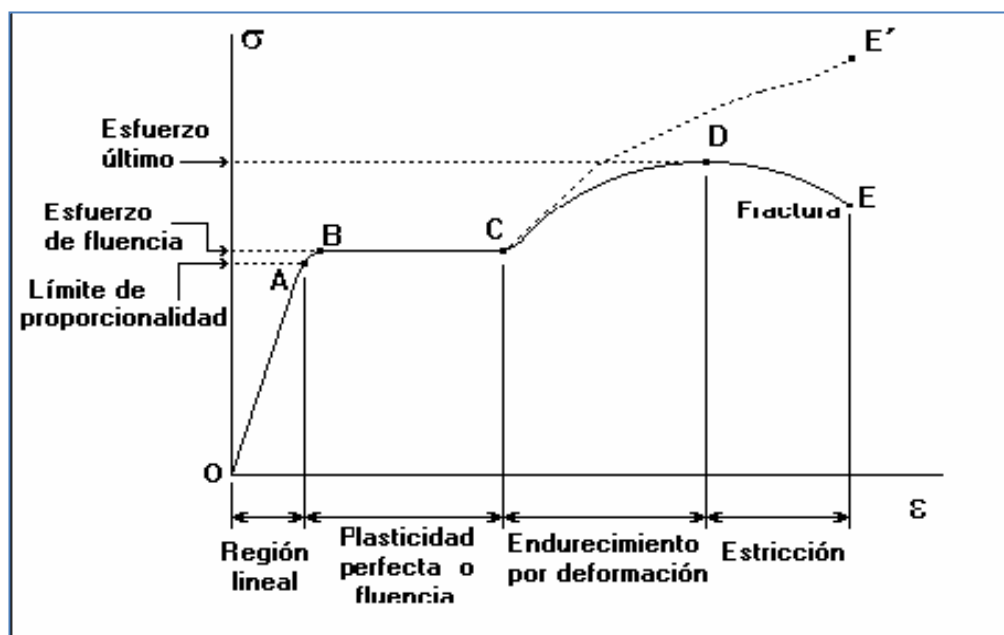


Fig 6 Diagrama de Tensión-Deformación

En este ensayo sometemos una probeta de dimensiones normalizadas a una deformación constante. Se toma registro de la fuerza requerida la cual se divide entre el área de la sección **sin deformar**, calculando el esfuerzo axial σ . A medida que la



probeta se alarga, disminuye su diámetro. Por este motivo, el valor real del esfuerzo axial es diferente al σ calculado anteriormente. Por eso a " σ " se le conoce como esfuerzo ingenieril. La curva C-E' representa la curva real del esfuerzo si calculásemos el área instantánea. A continuación haremos una breve descripción de las zonas de la gráfica:

- **PUNTO A:** Denominado "Limite de proporcionalidad". Hasta este punto, el comportamiento del esfuerzo es lineal. Si se le retira la carga la probeta vuelve a su forma original sin sufrir ninguna deformación permanente. La pendiente de esta recta se denomina "Modulo de elasticidad (MPa)" o "E". Dicho módulo de elasticidad o módulo de Young es a un material como la constante de rigidez a un muelle.

El módulo de elasticidad depende de la T^a del material. Dichos valores los consultaremos en la tabla C-6 del código ASME 31.3. , a continuación se muestra un fragmento de dicha tabla:

Material	E = Modulus of Elasticity, Msi (Millions of psi), at Temperature, °F									
	-425	-400	-350	-325	-200	-100	70	200	300	400
Ferrous Metals										
Gray cast iron	...	...	...	...	...	...	13.4	13.2	12.9	12.6
Carbon steels, C \leq 0.3%	31.9	...	...	31.4	30.8	30.2	29.5	28.8	28.3	27.7
Carbon steels, C > 0.3%	31.7	...	...	31.2	30.6	30.0	29.3	28.6	28.1	27.5
Carbon-moly steels	31.7	...	...	31.1	30.5	29.9	29.2	28.5	28.0	27.4
Nickel steels, Ni 2%-9%	30.1	...	...	29.6	29.1	28.5	27.8	27.1	26.7	26.1
Cr-Mo steels, Cr $\frac{1}{2}$ %-2%	32.1	...	...	31.6	31.0	30.4	29.7	29.0	28.5	27.9
Cr-Mo steels, Cr $2\frac{1}{4}$ %-3%	33.1	...	...	32.6	32.0	31.4	30.6	29.8	29.4	28.8
Cr-Mo steels, Cr 5%-9%	33.4	...	...	32.9	32.3	31.7	30.9	30.1	29.7	29.0
Chromium steels, Cr 12%, 17%, 27%	31.8	...	...	31.2	30.7	30.1	29.2	28.5	27.9	27.3
Austenitic steels (TP304, 310, 316, 321, 347)	30.8	...	...	30.3	29.7	29.0	28.3	27.6	27.0	26.5
Copper and Copper Alloys (UNS Nos.)										
Comp. and leaded Sn-bronze (C83600, C92200)	...	...	...	14.8	14.6	14.4	14.0	13.7	13.4	13.2
Naval brass, Si- & Al-bronze (C46400, C65500, C95200, C95400)	...	...	...	15.9	15.6	15.4	15.0	14.6	14.4	14.1
Copper (C11000)	...	...	...	16.9	16.6	16.5	16.0	15.6	15.4	15.0
Copper, red brass, Al-bronze (C10200, C12000, C12200, C12500, C14200, C23000, C61400)	...	...	...	18.0	17.7	17.5	17.0	16.6	16.3	16.0
90Cu-10Ni (C70600)	...	...	...	19.0	18.7	18.5	18.0	17.6	17.3	16.9
Leaded Ni-bronze	...	...	...	20.1	19.8	19.6	19.0	18.5	18.2	17.9
80Cu-20Ni (C71000)	...	...	...	21.2	20.8	20.6	20.0	19.5	19.2	18.8
70Cu-30Ni (C71500)	...	...	...	23.3	22.9	22.7	22.0	21.5	21.1	20.7

Fig 7 Tabla C-6 Asme B31.3

- **REGION A-B:** Ocurre un fenómeno denominado "Fluencia". Se genera una deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos que componen la aleación bloquean las dislocaciones de la estructura cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Al alcanzar el esfuerzo de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. No todos los



materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica no se aprecia con claridad.

Al esfuerzo de fluencia también se le conoce como “Limite de elasticidad” y se le denomina como “Sy” (Yield stress).

- **REGION C-D:** En esta región se produce una deformación permanente de la probeta, conocida como “Deformación plástica”. Si sometemos a una pieza a tensiones superiores a “Sy” la pieza queda deformada plásticamente y al retirar la carga no vuelve a su geometría original. Siempre que no superemos los niveles de tensiones del punto D la deformación de la pieza será proporcionada, es decir, la pieza se deformará pero sin generar discontinuidades geométricas abruptas.

Al valor de tensión en el punto D se le conoce como “Esfuerzo último de ruptura Su (ultimate stress)”.

Debemos tener en cuenta que no todos los materiales presentan una zona de endurecimiento por deformación muy marcada:

- **MATERIALES DUCTILES:** Presentan una zona clara de plasticidad. Se considera dúctil a un material que en el ensayo de tensión haya tenido más del 5% de deformación antes de la fractura. Se considera que la falla se presenta cuando el material empieza a fluir (falla por deformación)
- **MATERIALES FRAGILES:** Sufren muy poca deformación plástica antes de romper.

3.1.2. Teoría de fallas

Las teorías de fallas establecen criterios para definir hasta que niveles de tensiones es seguro someter a un componente mecánico. La selección adecuada de una teoría de fallas es de vital importancia, tanto para el correcto diseño de sistemas como en la competitividad económica y de alta eficiencia.

3.1.2.1. Teoría de la energía de distorsión o de Von Mises

Aplicable a materiales de naturaleza dúctil. Supone que la falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico, sea igual o mayor, a la energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia.



3.1.2.2. Teoría del esfuerzo cortante máximo o de Tresca

Esta teoría establece que la falla se producirá cuando el esfuerzo cortante máximo absoluto en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo cortante máximo absoluto de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento que se produce la fluencia.

La aplicación de esta teoría también va aplicada a materiales de naturaleza dúctil.

3.1.2.3. Teoría de Rankine o del máximo esfuerzo normal

Es aplicable a materiales de naturaleza frágil. Entre los materiales de tuberías con este comportamiento tenemos el hormigón y fundiciones de acero no dúctiles.

Establece que la falla se producirá cuando el esfuerzo normal máximo en la pieza, sea igual o mayor, al esfuerzo normal máximo de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento que se produce la fractura.

Nótese que las 2 primeras teorías asocian su falla al límite de fluencia S_y , mientras que la teoría de Rankine se compara con el esfuerzo último S_u . La norma ASME basa su formulación en la teoría de Tresca la cual aplica a materiales de naturaleza dúctil. En el párrafo 302.2.4 A del código ASME 31.3-2010 se establece lo siguiente:

“El sistema de tuberías no deberá incluir ningún componente sometido a presión de hierro fundido o materiales no dúctiles.”



3.2. CLASIFICACIÓN DE TENSIONES A LAS QUE ESTÁ SOMETIDO UN SISTEMA DE TUBERÍAS

En este capítulo se identificarán y explicarán los diferentes tipos de tensiones a los que está sometido un sistema de tuberías y como son categorizados y agrupados. Estos conceptos son fundamentales para entender cómo resolver y cómo interpretar los resultados de un análisis de flexibilidad.

Cuando un sistema de tuberías entra en operación, la presión del sistema se eleva hasta la presión interna “ P ” y su Temperatura cambia de temperatura ambiente “ T_{amb} ” a la temperatura de operación “ T ”. Como resultado de estas alteraciones, se modifica el estado de tensiones en los diferentes puntos de la tubería.

Así mismo, la tubería tiene una masa asociada, al igual que el fluido que contiene, los accesorios que se le conectan o el aislamiento que la recubre. Todo esto es conocido como “**Peso propio del sistema**” y genera un estado de tensiones que se suma a las asociadas por la presión interna. Ésta masa debe ser soportada, de manera que se establezca un equilibrio mecánico del sistema.

Al cambiar su temperatura, la tubería cambia de volumen como resultado de las expansiones térmicas. Esto induce un estado de deformaciones que se traduce en un cambio de tensiones de la tubería, adicional al generado por la presión y el peso propio. A éstas tensiones le llamaremos “**Tensiones térmicas**”.

Finalmente, la acción de fuerzas externas, tales como viento o sismo, también actúan sobre el equilibrio del sistema cambiando su estado de tensiones. A continuación realizaremos una breve explicación de los tipos de tensiones que originan cada uno de los esfuerzos enunciados anteriormente:

- **PESO PROPIO:** Actúa en la dirección de la gravedad, induce sobre el sistema momentos de flexión y de torsión. Está claro que si una tubería se orienta en el sentido de la gravedad, sobre ella actúa el peso como carga axial, pero las tensiones axiales que podrían generarse en un sistema “normal” resultan despreciables respecto a las generadas por flexión y torsión.
- **PRESIÓN INTERNA:** Genera tensiones normales sobre la pared de naturaleza axial y circunferencial.
- **DILATACIONES TÉRMICAS:** Tienen un comportamiento similar al de las acciones por peso propio, es decir, generan sobre la tubería momentos flectores y torsores. Es cierto que pueden generar fuerzas axiales muy grandes como resultado de dilatar una pieza cuando no tiene libertad de cambiar su volumen.



En un sistema de tuberías difícilmente encontraremos un tramo recto de tubo restringido en dos puntos a lo largo de su longitud.

Se debe tener en cuenta que los códigos ASME 31.1 y 31.3 no consideran las tensiones axiales dentro de su formulación. En ciertos sistemas, las tensiones axiales pueden tener una repercusión importante sobre el estado de tensiones. El mejor ejemplo es el de tuberías encamisadas, donde una tubería contiene a otra y se unen en sus extremos. Al tener temperaturas diferentes, la más fría es sometida a tracción mientras que la más caliente es sometida a compresión.

Nótese que las tensiones térmicas, el peso propio y las acciones externas tienen en común que generan un estado de cargas basado principalmente en flexión y torsión. Diferente a la acción que produce la presión sobre la tubería. Conviene analizar por separado las tensiones generadas por el efecto de la presión, del resto de tensiones generadas por acción de fuerzas, momentos flectores y de torsión.

Causa	Efecto
Peso propio del sistema	Momento flector y torsor sobre tubería
Presión interna	Tensión normal axial y circunferencial
Dilataciones térmicas	Momento flector y torsor sobre tubería
Acciones externas	Momento flector y torsor sobre tubería

Fig 8 Fuerzas y momentos que actúan en el sistema



3.2.1. Tensiones producidas por presión interna

La más común e importante de las tensiones a la que está sometida un componente de tuberías son las tensiones producidas por la presión interna. Cuando una tubería es presurizada, su superficie interna está sometida a la misma presión en todas las direcciones. La presión genera diferenciales de fuerza en la dirección normal, de los diferenciales de superficie sobre los que actúa.

La suma vectorial de todos esos diferenciales de fuerza, resulta en una fuerza resultante cuya magnitud se calcula como el área de la superficie proyectada en el plano normal a la línea de acción de la fuerza, multiplicada por la presión. Por tanto, la presión del fluido produce:

- σ_p : Esfuerzo circunferencial que genera deformación radial de la tubería aumentando su diámetro.
- σ_{lp} : Esfuerzo longitudinal que produce deformación axial de la tubería aumentando su longitud

La distribución de estas tensiones a lo largo del espesor de la pared puede suponerse uniforme siempre que la tubería pueda considerarse como un cilindro de pared delgada.

NOTA: Para considerar un cilindro de pared delgada debe cumplirse que el espesor “t” de la pared sea menor que la sexta parte del diámetro exterior.

ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL	$\sigma_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (t - c)} - Y \cdot P$
ESFUERZO LONGITUDINAL	$\sigma_{lp} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot (t - c)}$
CONDICION DE PARED DELGADA	$t < \frac{D}{6}$

Dónde:

- P = Presión
- D = Diámetro exterior de la tubería
- t = Espesor de la tubería
- c = Suma de las tolerancias mecánicas de la tubería
- Y = Factor adimensional de acuerdo al código ASME B31.3 tabla 304.1.1

Table 304.1.1 Values of Coefficient Y for $t < D/6$						
Materials	Temperature, °C (°F)					
	≤ 482 (900 & Lower)	510 (950)	538 (1,000)	566 (1,050)	593 (1,100)	≥ 621 (1,150 & Up)
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0	...	...	...	...	...

Fig 9 Tabla 304.1.1 ASME B31.3

- Para relaciones $t \geq D/6$ se calcula mediante la ecuación:

$$Y = \frac{d + 2 \cdot c}{D + d + 2 \cdot c}$$

3.2.2. Tensiones producidas por fuerzas y momentos

Un elemento sometido a la acción simultánea de fuerzas axiales, fuerzas normales puntuales y/o distribuidas, momentos de torsión y flectores, aparecen las siguientes tensiones:

- Tensiones de naturaleza normal: esfuerzos axiales y esfuerzos por flexión
- Tensiones de naturaleza cortante: Cortante por flexión y por torsión

Suponiendo una tubería como un elemento flexible en el espacio, sobre un sistema cartesiano definido sobre un punto de su sección, al seccionarla y representar su diagrama de cuerpo libre aparecen tres fuerzas y tres momentos, en cada dirección, como se muestra a continuación:

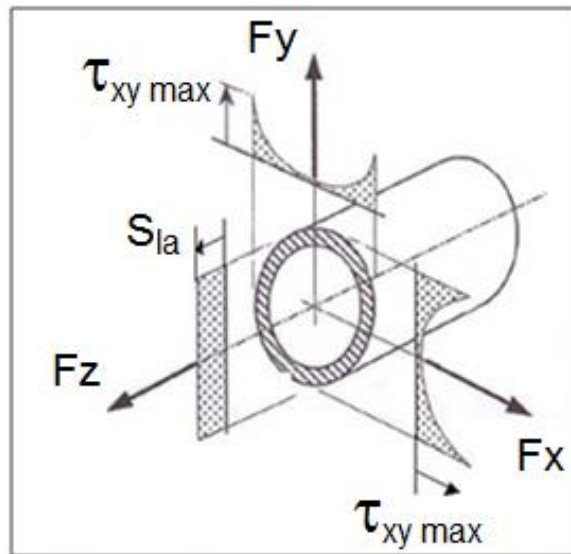


Fig 10 Tensiones producidas por fuerzas

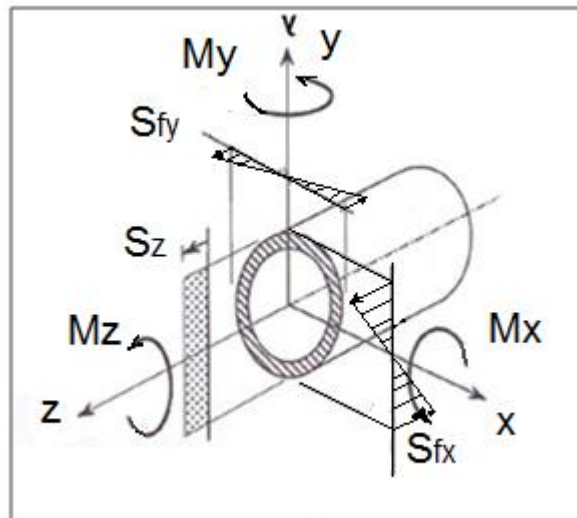


Fig 11 Tensiones producidas por momentos

La figura 3.1 refleja que F_x y F_y son acciones cortantes que generan las tensiones cortantes τ_{xy} en el plano XY. La fuerza F_z por su parte es una acción axial que genera tensiones normales axiales S_{LA} en dirección Z, en este caso generando tracción sobre la tubería.



La figura 3.2 muestra los momentos M_x y M_y actuando como momentos flectores, generando tensiones normales por flexión S_{fx} y S_{fy} respectivamente. Mientras que el momento M_z es un momento de torsión que genera tensiones de corte tangenciales S_z .

Dado que la sección circular tiene la misma inercia geométrica, tanto en la dirección X como en Y, es válido plantear una única fuerza de corte F_s y un único momento flector resultante M_f con sus respectivas tensiones resultantes τ_s y S_f .

Tensiones de corte	$\tau_s = \frac{2 \cdot F_s}{\pi \cdot (D - (t - c)) \cdot (t - c)}$	$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$
Tensiones por torsión	$Z = \frac{\pi}{32 \cdot D} \cdot (D^4 - (D - 2(t - c))^4)$	$S_z = \frac{M_z}{2 \cdot Z}$
Tensiones por flexión	$S = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{Z}$	
Esfuerzo longitudinal	$S_{la} = \frac{F_z}{\pi \cdot (D - (t - c)) \cdot (t - c)}$	

- Z = módulo de sección de la tubería

3.2.3. Tipos de esfuerzos a analizar

Según especifican las normas ANSI (American National Standard Institute) existen cuatro tipos de esfuerzos que debemos analizar.

3.2.3.1. Esfuerzos circunferenciales debidos a la Presión

Con el análisis de los esfuerzos circunferenciales podremos determinar el espesor o “Schedule” de la tubería. Este cálculo lo efectúa el grupo de materiales.

3.2.3.2. Esfuerzos sostenidos o primarios

Son los esfuerzos longitudinales provocados por la acción de cargas sostenidas, tales como: Peso de la tubería, del aislamiento y del fluido contenido en ella, fuerzas(concentradas o distribuidas), momentos aplicados y presión interna.

Una característica a tener en cuenta de estos esfuerzos es que no son auto limitantes, es decir, su sola acción puede causar deformación plástica o falla inminente del material. Los esfuerzos primarios se pueden controlar soportando adecuadamente el sistema de tuberías.

Este tipo de esfuerzos se calculan según la siguiente expresión:

$$Sl = A \frac{P \times Do}{4t} + B \frac{i \times Ma}{Z} \leq C \times Sh$$

Dónde:

- A, B, C : son constantes adimensionales que dependen del código a utilizar. Para ASME B 31.3 , que será el código utilizado para nuestro análisis, tiene un valor de “1”.
- P : Presión interna de la tubería (Psi)
- Do: Diámetro externo de la tubería (pulgadas)
- t : espesor de la tubería (restándole el espesor por corrosión y la tolerancia de fabricación)
- i : factor de intensificación de esfuerzos (adimensional)
- Ma : Momento flector debido a cargas sostenidas (lb x pulgada)
- Z : Módulo de sección de la tubería
- Sh : Es el esfuerzo admisible

El esfuerzo admisible según el código ASME para los esfuerzos primarios viene relacionado directamente con “ S_H “ , esfuerzo en caliente, que va cambiando en función de la temperatura del material. Dichos valores los podemos encontrar en la tabla del apéndice A ASME B31.3. Lo que se pretende es limitar las tensiones admisibles por debajo del límite de fluencia.

3.2.3.3. Esfuerzos por expansión o secundarios

Son originados por las reacciones que se producen en las restricciones impuestas al sistema ante la expansión o contracción del mismo debido a variaciones de temperatura. Podemos controlar dichos esfuerzos variando el diseño para hacer más flexible al sistema, reubicando soportes o usando elementos elásticos (juntas de expansión).

Es importante saber que los esfuerzos secundarios son auto limitantes, ellos se alivian en un lapso determinado de tiempo debido a la relajación térmica del material tras los primeros ciclos.

El esfuerzo permisible según ASME para los esfuerzos secundarios está asociado directamente con el “rango permisible de esfuerzo por desplazamiento S_A ”. Está basado en los valores del esfuerzo básico “caliente” y “frío” S_H y S_C multiplicado por un factor cíclico o de fatiga. Debido a la cantidad de ciclos que experimentan los sistemas de tuberías, pueden aparecer grietas por fatiga. Dichas grietas pueden darse por imperfecciones en la superficie o en el interior de las tuberías, que junto con la corrosión se convierten en puntos de intensificación de esfuerzos.

La norma ASME define S_A como:

$$S_A = f \cdot (1,25 \cdot S_C + 0,25 \cdot S_H)$$

Dónde:

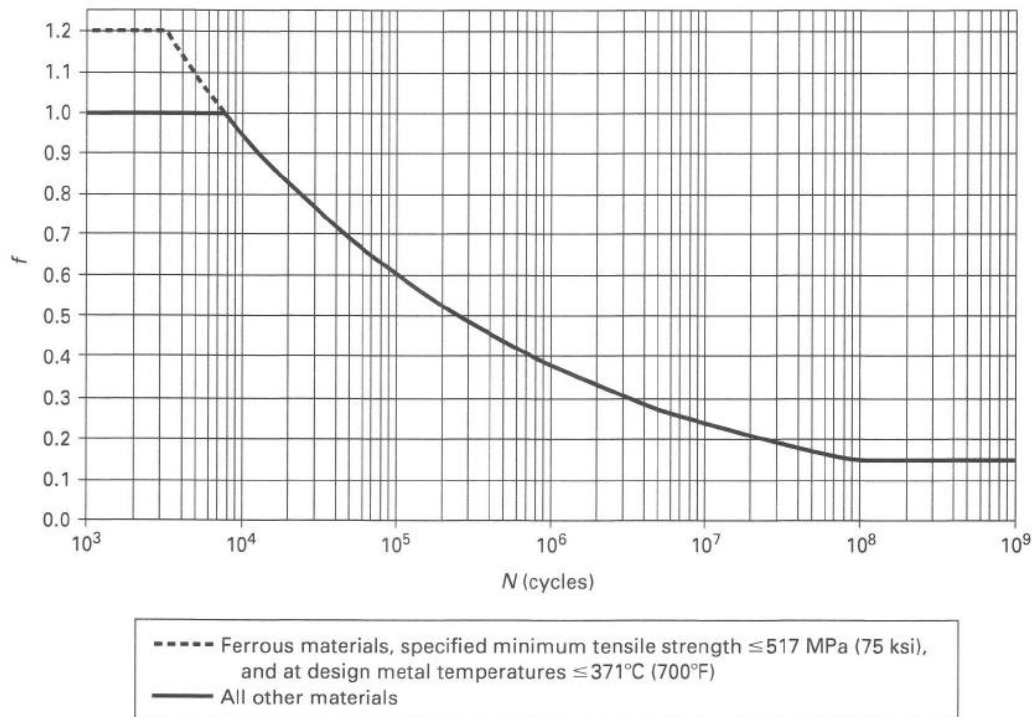
- f : Factor para cuantificar el efecto cíclico
- S_C : Esfuerzo básico admisible a temperatura ambiente
- S_H : Esfuerzo básico admisible a la temperatura de operación
- Los valores S_C y S_H se obtienen en la Tabla A-1 del Apéndice A del B31.3

Si del primer caso de estudio, los esfuerzos por cargas sostenidas son menores que los admisibles, la diferencia entre ellos puede ser añadida al término $0.25 S_H$ como se muestra a continuación:

$$S_A = f (1,25 S_C + 0,25 S_H + S_H - S_L)$$

$$S_A = f [1,25 (S_C + S_H) - S_L]$$

El factor de corrección “ f ” según la última revisión de la norma B31.3 se rige por la siguiente gráfica:

Fig. 302.3.5 Stress Range Factor, f

Fig 12 Función del factor cíclico f

Dónde:

- f : factor cíclico representado de la función $f = 6 (N)^{-0.2} \leq f_m$
- f_m : máximo valor tomado por f igual a 1,2 únicamente para materiales féreos que posean un $S_U \leq 517$ MPa y cuya temperatura del metal sea $\leq 371^\circ\text{C}$
- N : número equivalente de ciclos que se producirán durante la vida útil de la instalación.

El esfuerzo con el que compararemos S_A será el esfuerzo S_E , que según ASME B31.3 se calcula con la siguiente forma:

$$S_E = \sqrt{(S_B^2 + 4S_T^2)}$$

Dónde:

- S_B : Resultante de todos los esfuerzos por flexión tanto en codos, tees y conexiones de ramales.
- S_T : Es el esfuerzo torsional y se calcula como $S_T = M_T / (2Z)$
- M_T : Momento torsor
- Z : Módulo de sección de la tubería

Digamos que en función del componente a analizar, utilizaremos el módulo de sección de la tubería Z o el módulo de sección equivalente Z_E .

Si estudiamos codos y tees rectas aplicamos la siguiente fórmula:

$$S_B = \frac{\sqrt{(i_I \times M_I)^2 + (i_O \times M_O)^2}}{Z}$$

- i : Factor de intensificación de tensiones correspondiente, se calcula según el apéndice D de la norma B31.3
- M : Momento flector
- Z : Módulo de sección de la tubería

Para poder entender adecuadamente los momentos y factores de intensificación dentro (subíndice i) y fuera del plano (subíndice o) necesarios para calcular los esfuerzos debidos a flectores y torsores, es necesario ilustrarse con las siguientes figuras:

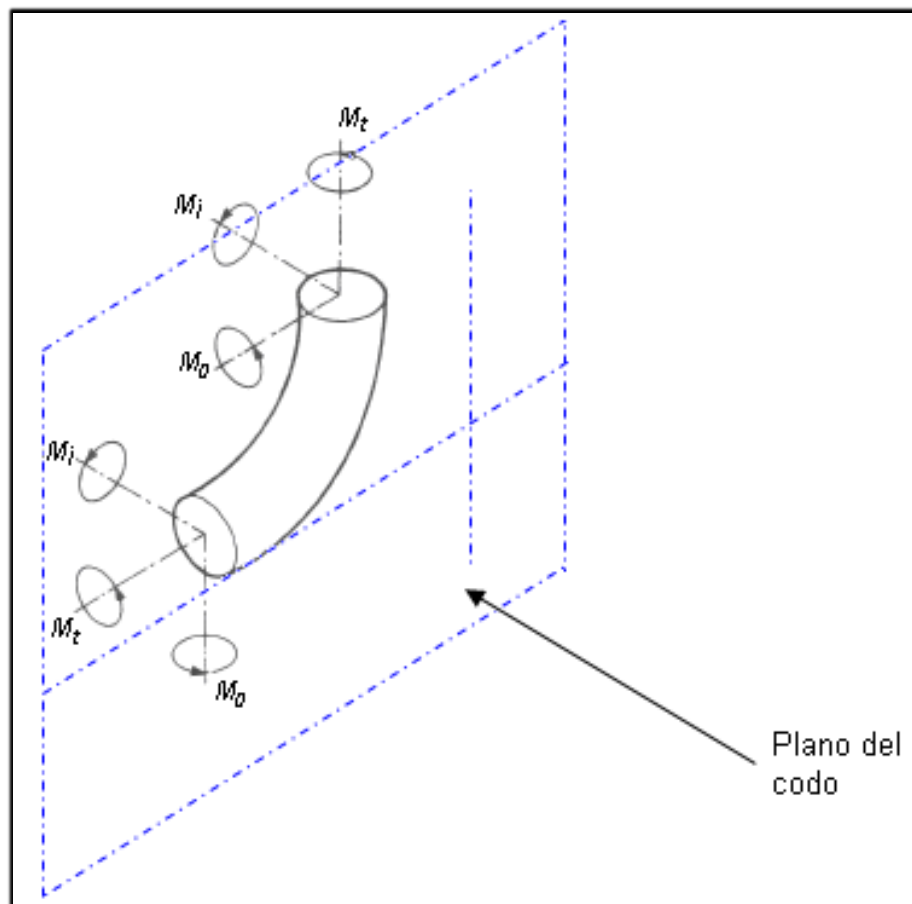


Fig 13 Representación de momentos en un plano de un codo a 90°

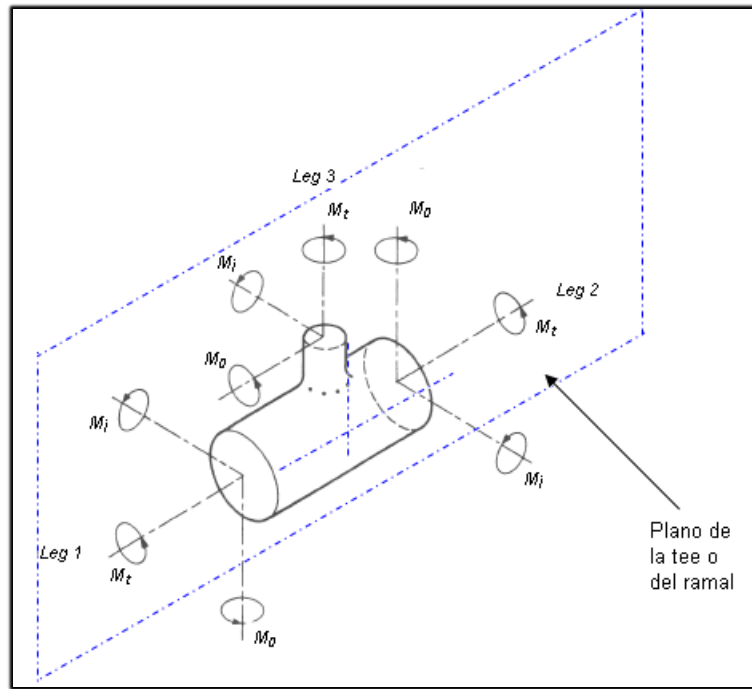


Fig 14 Representación de momentos en un plano de una tee reductora

Cuando analizamos un ramal reducido aplicamos el módulo de sección equivalente Z_E :

$$Z_E = \pi r^2 T_s$$

- r = radio medio del área transversal del ramal o reducción
- T_s = Espesor de pared efectivo del ramal

3.2.3.4. Esfuerzo ocasional o terciario

Este tipo de esfuerzo, como su nombre indica, se produce bajo la acción de agentes eventuales como:

- Viento
- Sismo
- Descarga de alivios
- Golpes de ariete
- Vibraciones

El código en el párrafo 302.3.6 establece que los efectos de cargas ocasionales deben ser adicionados a los efectos de cargas sostenidas y la suma de estos efectos, no debe exceder 1,33 veces el esfuerzo admisible básico a temperatura Sh .



En la formulación de S_L se deberá incluir en cada una de las fuerzas y momentos, la contribución sobre esa fuerza o momento del efecto de carga ocasional, sin que se consideren más de un efecto a la vez. Según ASME B31.3 estos esfuerzos deben ser verificados de forma que cumplan la siguiente relación:

$$S_{Lsustained} + S_{L\ Occasional} \leq 1.33S_H$$

3.3. FUNCIONES DEL ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD

Entendemos por análisis de flexibilidad:

- Cálculo de tensiones en un sistema de tuberías sujeto a cargas de operación tales como Presión, peso, expansiones térmicas así como cargas ocasionales (sismo, viento, golpe de ariete...).
- Cálculo de las fuerzas y momentos en las conexiones con los equipos, así como el efecto de dichas acciones sobre éstos.
- Definición del conjunto de soportes sobre el sistema de tuberías para el control de tensiones.

El principal objetivo de un análisis de flexibilidad es garantizar la operatividad continua del sistema.

El fallo de la tubería por efectos asociados a las tensiones como causante de la interrupción de operación del sistema, rara vez ocurre. En el análisis de un sistema, la mayor dedicación debe concentrarse en el análisis de los componentes que están conectados a ella.

Los problemas más comunes que interrumpen la operatividad del sistema son:

- Fuga en bridas: Generalmente afecta el entorno de la zona donde se produce fuga, aunque si se trata de fluidos peligrosos podría poner en riesgo la vida del personal de la planta.



Fig 15 Fuga en brida

- Bloqueo de válvulas debido a deformaciones excesivas o fatiga de sus partes.



Fig 16 Fallo por fatiga

- Deformaciones excesivas y/o agrietamientos en toberas de recipientes a presión debido a efectos de tensiones excesivas localizadas que además favorecen el ataque de la corrosión.



Fig 17 Fallo de tobera por deformación

- Mal funcionamiento o acortamiento de la vida útil de los equipos rotativos por efecto de las cargas transmitidas a través de las conexiones de tuberías.



Fig 18 Desgaste prematuro

La siguiente imagen representa el alcance del concepto actual del análisis de flexibilidad:

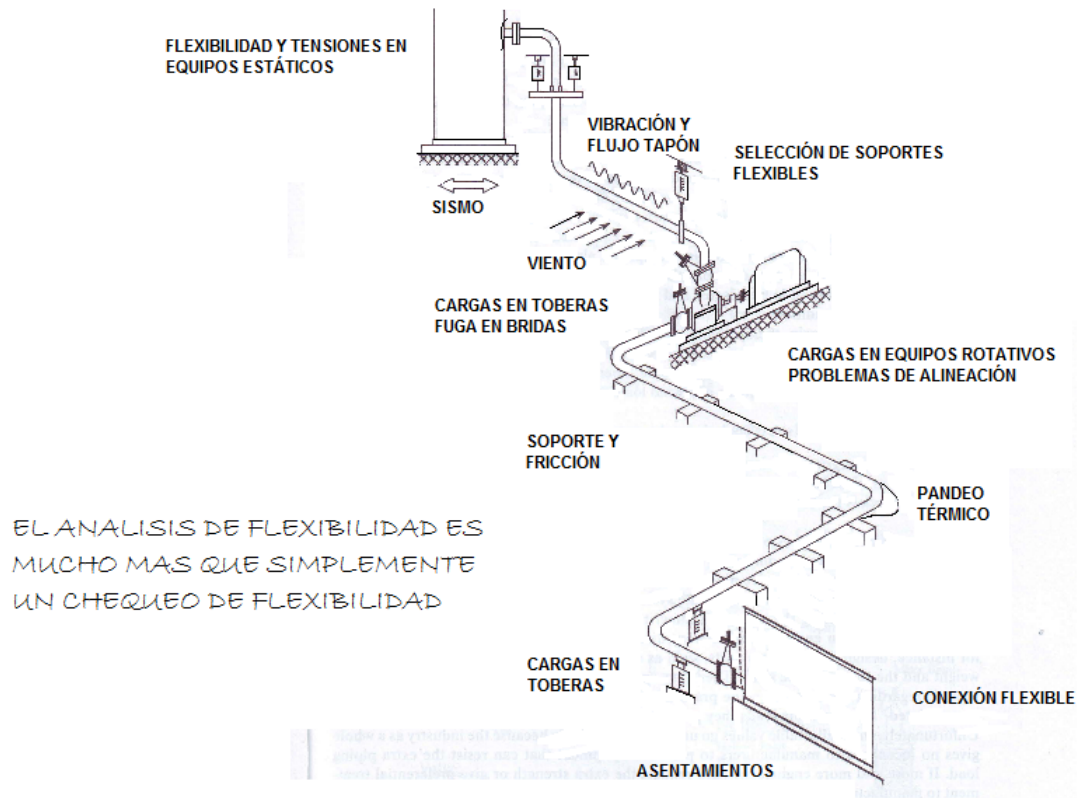


Fig 19 Descripción análisis de flexibilidad

El primer paso será “garantizar la integridad estructural del sistema”, aunque es sólo una parte del análisis. Fallos en este apartado normalmente se detectan en el arranque de la planta. Pueden ocasionar problemas graves pero lo más importante para un cliente es la garantía de una operación continua, lo que equivale a una producción y beneficio continuo.

Cabe destacar que otros departamentos, como pueden ser los de recipientes, mecánica..., encargadas de la compra de los equipos correspondientes a cada área, suelen pasar por alto las cargas transmitidas por las tuberías que conectan a sus equipos. Una mayor comunicación entre disciplinas, así como un análisis temprano de dichas cargas se hace fundamental para poder solventar ciertos problemas.



3.4. CÓDIGOS Y NORMAS

Una serie de accidentes ocurridos en plantas industriales y nucleares, por ejemplo PEMEX (planta de petróleos mexicanos) con aproximadamente 500 fallecidos, ha llevado a diferentes organismos mundiales, compañías de ingeniería, aseguradoras, propietarios de industrias y fabricantes de equipos a crear y actualizar la normativa de diseño y códigos para el diseño y construcción de plantas industriales y nucleares de una manera segura y rentable.

El análisis de flexibilidad se rige básicamente por tres tipos diferentes de normativas y/o códigos

3.4.1. Códigos internacionales

Son códigos de aplicación internacional y son el punto de referencia para diseñadores, fabricantes y constructores. Las normas y códigos internacionales más utilizados en los proyectos de plantas industriales y que son también de aplicación al presente proyecto son los siguientes:

- **ASME B31.1 Power Piping**: Aplicable a tuberías en plantas de generación de energía, sistemas de calentamiento geotérmico y sistemas centralizados de calentamiento/enfriamiento.
- **ASME B31.3 Process piping**: Aplicable a refinerías de petróleo, plantas químicas, farmacéuticas...Plantas de proceso en general.
- **API 610 Centrifugal pumps for petroleum, heavy duty chemicals and gas industry**: Estándar que indica los requerimientos mínimos para las bombas centrífugas que se utilizan en la industria petrolera.

3.4.2. Códigos y normativas locales

Son códigos y normativas de aplicación local del país donde se construirá la planta. Al inicio de un proyecto siempre se debe verificar la normativa local aplicable. Como ejemplo presentamos una normativa que se aplica en proyectos dentro de la Unión Europea:

- **BS EN 13480-3:2002** : Metallic industrial piping. Design and calculation.



3.4.3. Especificaciones propias del proyecto

Se trata de especificaciones y requerimientos propios del proyecto en sí, normalmente creados por el cliente o la compañía encargada del diseño y construcción.



4. Los soportes de tuberías

Una vez analizada la organización de los departamentos que constituyen un proyecto, y profundizar en el análisis de flexibilidad, ahora explicaremos qué se entiende por soportar un sistema de tuberías. También realizaremos un breve repaso de los tipos de soportes existentes y aplicación de los mismos. Es importante tener en cuenta que cada proyecto tiene su propia especificación de soportes, que no tiene por qué coincidir con la de otros proyectos.

Los circuitos de tuberías existentes en una instalación industrial han de ser soportados adecuadamente, respondiendo a múltiples situaciones o fenómenos a los que pueden estar sometidos. El objetivo fundamental del soportado de tuberías es asegurar lo siguiente:

- Cumplir con la exigencia de mantener las tensiones en la tubería, en los puntos de apoyo y en los puntos intermedios entre dos apoyos adyacentes, dentro de las máximas admisibles establecidas en los códigos.
- Mantener su configuración geométrica en todas las situaciones durante su funcionamiento y su no funcionamiento.
- No sobrepasar la flecha máxima establecida para cada caso, en cualquier punto del trazado de la tubería, como consecuencia del peso propio.
- Evitar la sobrecarga de las toberas de los equipos u otras conexiones de tubería, a las que el sistema está conectado.

Para asegurar estas premisas, se tendrán en cuenta las influencias que pueden tener sobre el sistema:

- La puesta en marcha, la operación normal y la parada del circuito
- La influencia del viento o sismo
- Los asentamientos de los equipos a los que están conectados las tuberías

4.1. TIPOS DE SOPORTES

4.1.1. Soportes estructurales

Se denominan como soportes estructurales a todos aquellos soportes, estructuras de apoyo y accesorios formados por perfiles que en la mayoría de los casos no van soldados a la tubería. Entre ellos se encuentran los soportes anclados a equipos (clips), los cristos, trapecios, pórticos y ménsulas. En las siguientes figuras se muestran ejemplos de soportes estructurales:

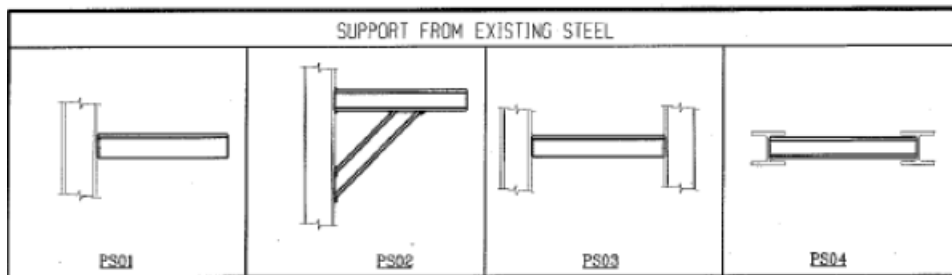


Fig 20 Ejemplos de soportes estructurales

4.1.2. Soportes para control de desplazamiento

Las tuberías pueden y suelen sufrir desplazamientos longitudinales o laterales. Existen dos tipos de soportes para controlar estos desplazamientos:

- Guías: Son utilizadas para restringir el desplazamiento lateral de un punto de la línea. Pueden utilizarse tanto para tramos verticales como horizontales.
- Limites direccionales (stops): Utilizados para restringir el movimiento longitudinal de un punto de la tubería.

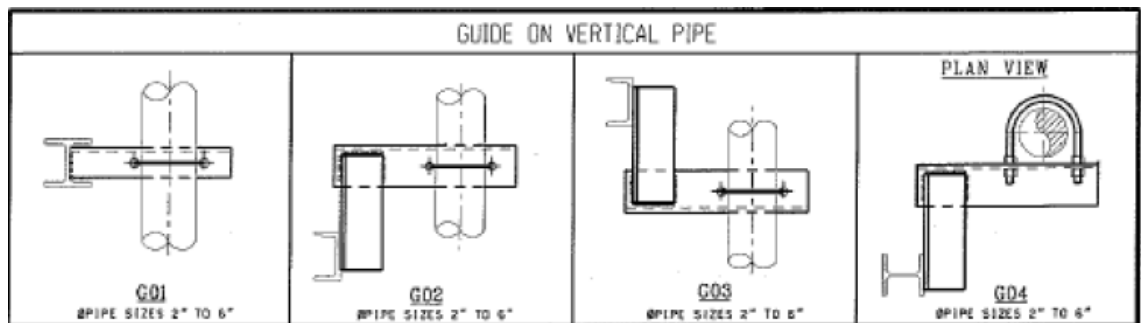


Fig 21 Ejemplos de soportes para el control de desplazamiento

4.1.3. Soporte para protección del apoyo

Cuando trabajamos con tuberías de gran tamaño, nos encontramos con problemas de aplastamiento y corrosión en el punto de apoyo. Se emplean cunas y silletas para evitar estos problemas.

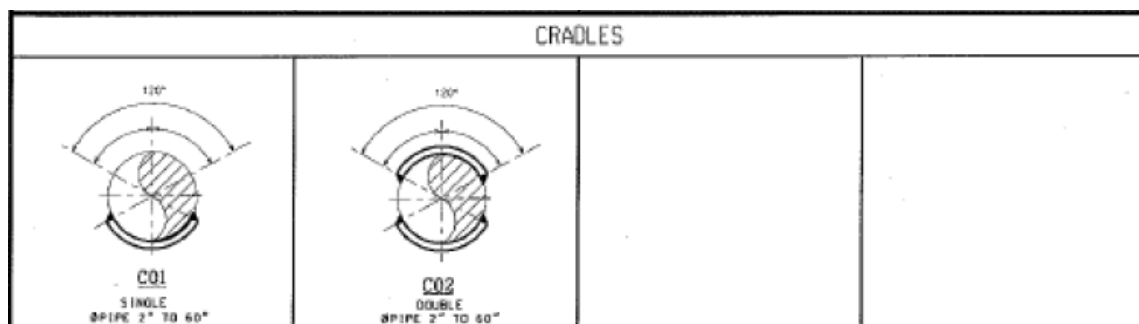


Fig 22 Ejemplos de soportes para protección de apoyos

4.1.4. Soportes elásticos

Cuando necesitamos controlar la carga y el desplazamiento simultáneamente, utilizamos los soportes elásticos. Estos pueden diferenciarse en dos grupos: Muelles de carga variable y de carga constante.

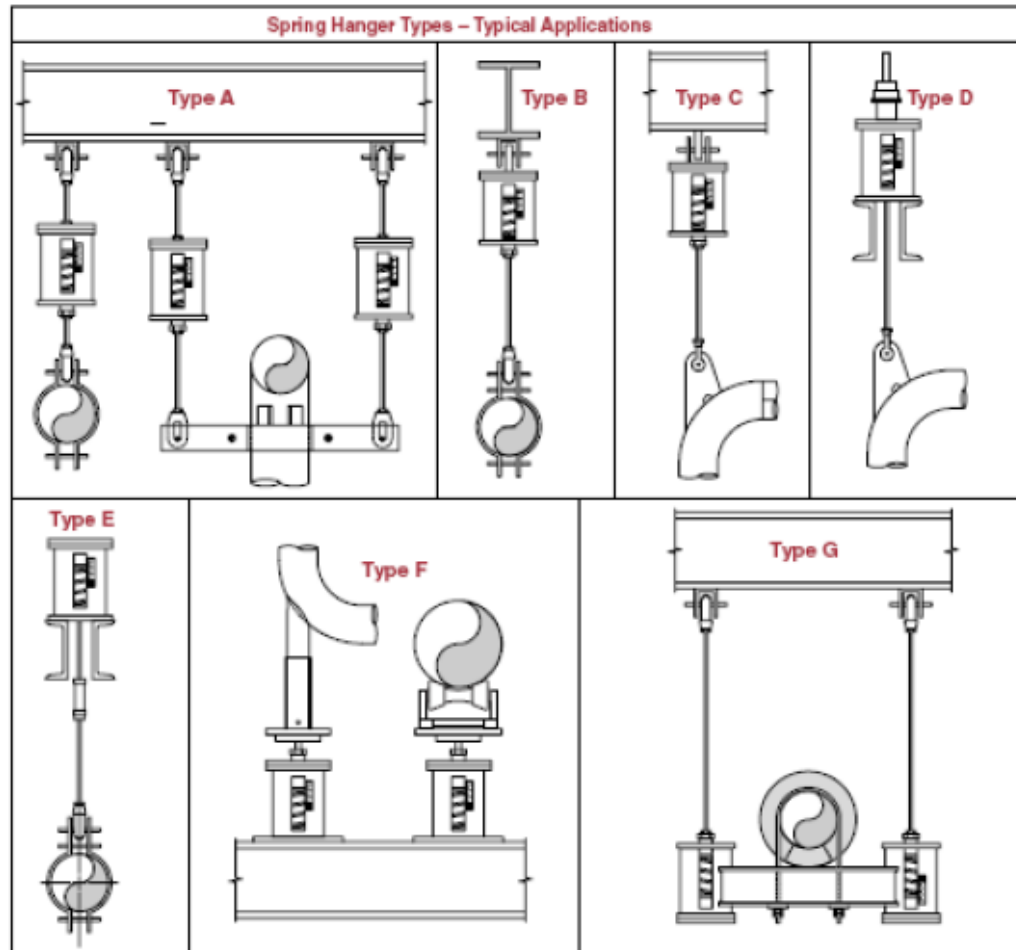


Fig 23 Ejemplos de soportes elásticos



4.1.5. Otros elementos de soportación

Dentro de esta categoría estarían soportes no tan comunes como los anteriores y que tratan de solventar diferentes problemas:

- Soportes anti vibraciones: Se usan en líneas en las que existe riesgo de que el material entre en resonancia. Tienen elementos que rigidizan la línea absorbiendo las vibraciones.
- Amortiguadores: Se trata de soportes que absorben posibles impactos producidos en la línea por efectos hidráulicos como puede ser el golpe de ariete.
- Otros: Las posibilidades que ofrecen los diferentes elementos de los que están compuestos los soportes son tantas que, dependiendo del soporte concreto y de la criticidad del mismo para la flexibilidad de la línea, se pueden diseñar soportes especiales según el caso en cuestión.



5. Propuesta de optimización del proceso de diseño

En los capítulos anteriores se dio una visión general de los departamentos involucrados en un proyecto, así como las principales labores a realizar por cada uno de ellos. Llegados a este punto, abordaremos el proceso de diseño actual dentro del departamento de tuberías y la problemática que ocasiona dicho proceso. Una vez estudiada la situación actual, trataremos de implementar una serie de cambios, en dicho proceso, con la finalidad de mejorar la ejecución y solventar ciertos problemas derivados del proceso actual de diseño.

5.1. PROCESO DE DISEÑO ACTUAL

El grupo de diseño es el primero que comienza a realizar la maqueta 3D de un proyecto. Para poder llevar a cabo dicha labor, es necesaria la siguiente documentación:

- Hojas de datos preliminares de equipos
- Diagramas de proceso e instrumentación (P&ID)
- Especificaciones y estándares del cliente
- Documentación referente a seguridad, operatividad y mantenimiento
- Planos de planta (Plot plans)
- Lista de líneas del proyecto

Es importante destacar que la mayoría de esta información es preliminar. Debido al apretado calendario de entrega, se comienza a trabajar con información prematura, sujeta a cambios a lo largo de la fase de desarrollo del proyecto. Por este motivo, el departamento de diseño comienza con el modelado en el siguiente orden:

- Modelado de equipos
- Modelado de las estructuras preliminares así como de las plataformas asociadas a dichas estructuras o equipos.
- Modelado de líneas: Primero las líneas clasificadas como aéreas (Above ground) y posteriormente las enterradas (underground)

Una vez modelados los equipos y estructuras preliminares, pasan a los departamentos correspondientes para que implementen el diseño definitivo. Así como los diseños de sistemas de tuberías van pasando al grupo de stress y soportes para que validen el diseño según normativa pertinente. Esta sucesión es necesaria ya que el diseñador necesita los equipos, aunque no sean definitivos, para poder conectarse a ellos. La ventaja de trabajar con equipos con diseño provisional es poder orientar las conexiones a equipos o toberas de dichos equipos en función de las necesidades de la línea a diseñar, permitiendo realizar el diseño más viable en cada caso. También necesitamos las estructuras preliminares, dichas estructuras pueden ser:

- Estructuras asociadas a equipos: Necesarias para poder realizar el diseño sin interferencias con otros elementos así como garantizar la accesibilidad a componentes como válvulas, indicadores, bocas de hombre...

- Estructuras o bandejas para tuberías (Pipe racks): Suelen ser utilizadas en las unidades de proceso y en la interconexión de unidades.

Una vez modelados los equipos y estructuras preliminares, es el momento de diseñar tuberías. Como ya hemos explicado antes, dentro del departamento de tuberías, existen tres grupos diferentes: Materiales, Diseño y stress y soportes. Las labores a estudiar en este proyecto son las de los grupos de diseño y stress. Para ello, a continuación se muestra un diagrama que muestra el flujo de trabajo actual:

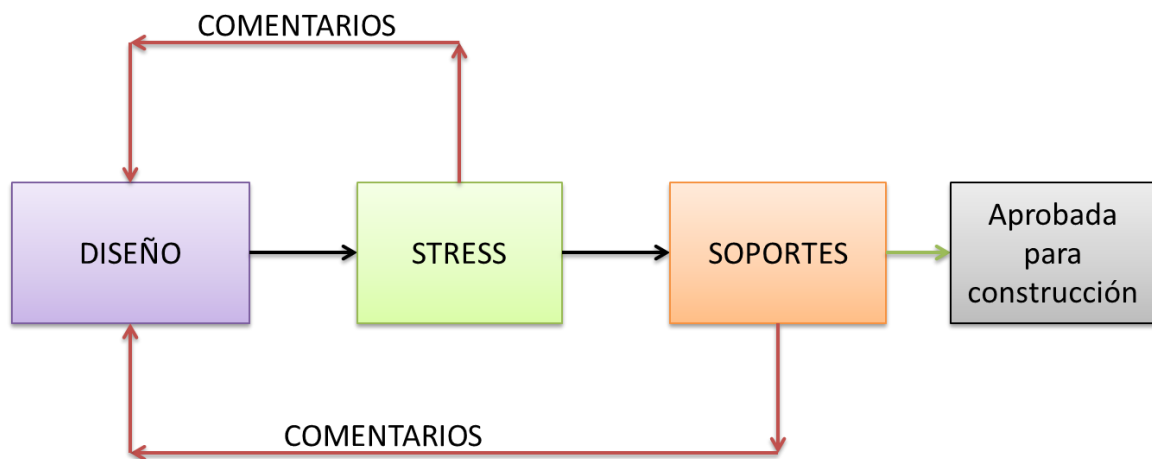


Fig 24 Proceso de diseño actual

Como vemos en el gráfico, el proceso de diseño actual sigue las siguientes máximas:

- El grupo de diseñadores comienzan el diseño de las tuberías. Una vez van finalizando dichos diseños, se extrae el plano isométrico y se le envía al grupo de stress.
- El grupo de stress es el encargado de comprobar que los diferentes esfuerzos sufridos por la tubería están dentro de la seguridad según indican los códigos. Estas comprobaciones se establecen en función de la categoría de la línea a analizar. Más adelante explicaremos que se entiende por “categorización de tuberías”. Una vez comprobados los diferentes esfuerzos y dilataciones, proceden a hacer una suportación preliminar de la línea, y editan la isométrica para el grupo de soportes. En caso de que existiesen elevados esfuerzos por encima de la norma, devolverían el plano isométrico de dicha línea con comentarios al grupo de diseño para que rediseñaran la línea.

- El grupo de soportes es el encargado de materializar los soportes en base a unos estándares. El grupo de flexibilidad refleja los soportes y restricciones principales, requisitos mínimos para garantizar el buen funcionamiento del sistema. La determinación de los soportes restantes así como la ingeniería de detalle de todos ellos son elaborados por el grupo de soportes. En caso de no encontrar una configuración satisfactoria y segura de los soportes, procederían a realizar los comentarios pertinentes y devolver la isométrica a diseño para que rediseñaran la zona conflictiva.
- Una vez validada la isométrica para construcción, se aprobará y se mantendrá su diseño hasta el desarrollo de la construcción. En caso de realizarse cambios inesperados en las condiciones o en la obra, se realizará una modificación de la maqueta y se extraerá un nuevo isométrico.

5.2. CATEGORIZACIÓN DE TUBERÍAS

Para poder comprender el proceso completo y la propuesta de optimización es imprescindible explicar en qué consiste la categorización de tuberías. Una vez tenemos un listado de las líneas sujetas a estudio de flexibilidad, llevaremos a cabo una categorización inicial teniendo en cuenta las condiciones de presión y temperatura de cada una de ellas. A continuación se definen las categorías de clasificación de líneas.

5.2.1. Categoría I

Dentro de esta categoría encontramos líneas de alta criticidad que deben ser detectadas al inicio del proyecto. A esta categoría pertenecen:

- Líneas de alta presión
- Líneas de transferencia a hornos
- Líneas de diámetro mayor de 48" o relación de diámetro/espesor " $D/t > 100$ "
- Líneas de transporte de fluidos categoría M según ASME
- Líneas de gas natural licuado LNG
- Líneas con juntas de expansión
- Líneas a muy altas temperaturas (superiores a 450°C)
- Líneas sometidas a fatiga con más de 23000 ciclos



5.2.2. Categoría II

Estas líneas necesitan análisis formal por ordenador. Dentro de esta categoría tenemos:

- Líneas conectadas a bombas y compresores que cumplan con lo siguiente:
 - 1- Diámetros mayores de 3" y Temperatura $\geq 70^{\circ}\text{C}$ o $\leq 5^{\circ}\text{C}$
 - 2- Diámetros mayores de 12" y Temperatura $\geq 60^{\circ}\text{C}$ o $\leq 5^{\circ}\text{C}$
- Líneas conectadas a enfriadores por aire
- Líneas conectadas a recipientes a presión
- Líneas sometidas a vibraciones
- Líneas sometidas a fatiga con ciclos menores a 22000
- Líneas sometidas a cargas ocasionales importantes y que requieran algún análisis dinámico.

5.2.3. Categoría III

Las líneas pertenecientes a esta categoría deben ser analizadas obligatoriamente, pero no son necesarios métodos computarizados, están permitidos métodos manuales. A esta categoría pertenece:

- Todas las líneas conectadas a equipos sensibles que no hayan sido tomadas en cuenta en la categoría II por su tamaño y Temperatura.
- Líneas seleccionadas teniendo en cuenta la siguiente tabla.

5.2.4. Categoría IV

Se encuentran en esta categoría las líneas que sólo requieren un análisis visual:

- Líneas que sean reemplazos de líneas existentes con pequeños cambios
- Líneas que tengan diseños iguales a otras existentes dentro de la planta y que tengan las mismas condiciones de operación y diseño.



- Líneas que por semejanza a estudios previos realizados, pueda desecharse el efectuar un cálculo.
- Gráfico para categorizar los sistemas de tuberías:

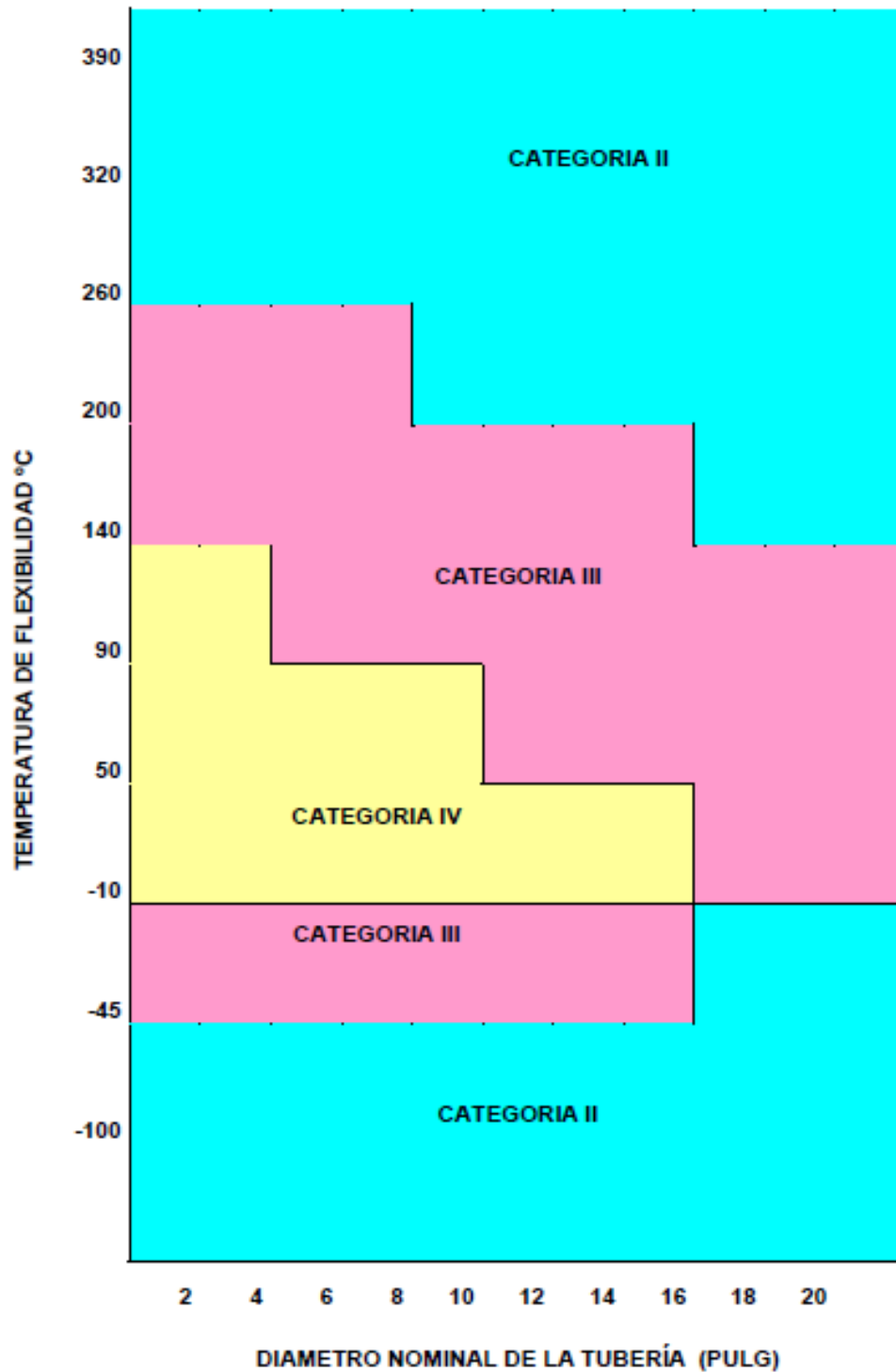


Fig 25 Ejemplo standard de categorización de líneas

5.3. PROCESO DE DISEÑO OPTIMIZADO

Una vez analizado el proceso de diseño actual así como la categorización de las distintas líneas dentro de una planta, debemos abordar la problemática actual para poder comprender la necesidad de mejorar el proceso. Como observamos en la figura 24, tenemos una secuencia que va desde el grupo de diseño al de stress y finalmente al de soportes. Al existir una categorización de líneas, una vez van llegando al grupo de stress, se procede a analizar en función de la categoría de la línea. Las líneas de categoría I son tremendamente complicadas, y requieren profesionales con una dilatada experiencia para su análisis y soportación, no pueden ser analizadas por un analista corriente. En cambio, las líneas de categorías III y IV son habitualmente sencillas y su análisis puede ser realizado por personal con una menor experiencia. Las líneas de categoría II poseen una dificultad intermedia entre las nombradas anteriormente. Con el actual procedimiento de trabajo nos encontramos con varios problemas, como son:

- Excesivas ediciones de líneas: Existen gran cantidad de líneas de categorías II y III que son diseñadas pero su análisis de flexibilidad se demora en el tiempo ya que no son líneas “peligrosas o críticas”. El resultado de esta práctica es que se detectan errores de diseño o diseños no adecuados para cumplir la normativa pero esto ocurre demasiado tarde. Como resultado, se devuelve la línea a diseño y se cambia la parte del trazado conflictiva. Se plantea el problema de tener diseños aprobados que realmente son erróneos y la gran cantidad de re-ediciones de isométricas, que dan una mala imagen de la empresa e incluso pueden repercutir en penalizaciones por parte del cliente.
- Compra innecesaria de material: Debido a lo expuesto en el apartado anterior, al tener diseños aprobados pero no analizados/validados, al realizar el recuento de material continuo, puede darse el caso de comprar material que no se corresponde con la realidad. Al existir plazos tan ajustados para la consecución del proyecto, se trata de verificar y comprar el material cada cierto tiempo para que llegado el momento de la construcción no nos encontremos con falta de material, que ocasionaría la paralización de la obra y grandes pérdidas debido a la gran cantidad de personal paralizado.
- Retrasos en la finalización del proyecto: Otro gran problema que ocurre actualmente radica en el control y planificación del avance del proyecto. Se establece unos porcentajes en función del número de líneas modeladas, pero dichos porcentajes no tienen en cuenta que muchas de dichas líneas serán

modificadas ya que transcurre cierto tiempo hasta que se analizan y se soportan. Esto además de los problemas anteriores, nos dificulta a la hora de saber el estado actual del proyecto.

Para intentar solucionar parte de estos problemas y mejorar la coordinación y la eficiencia del trabajo se propone cambiar el proceso de trabajo al siguiente:

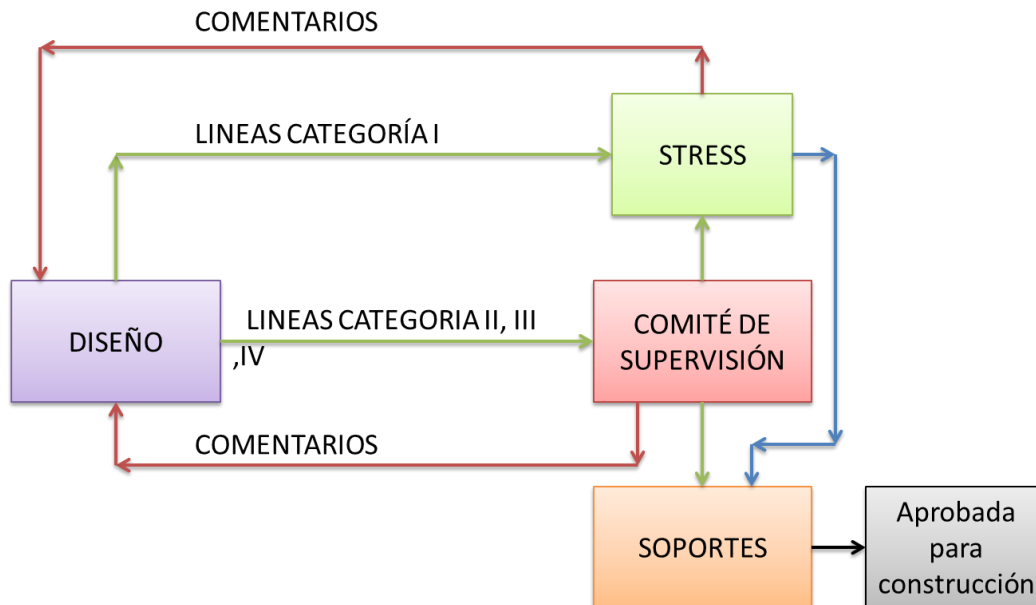


Fig 26 Proceso de diseño optimizado

Como podemos observar, se ha incluido un nuevo “grupo” dentro de los vistos anteriormente, es el denominado “Comité de supervisión”. Dicho comité ayudará a agilizar los análisis y además cubrirá análisis que anteriormente se dejaban en un segundo plano. El procedimiento sería el siguiente:

- Las líneas de categoría I (tremendamente complicadas) pasarán del grupo de diseño al de stress directamente, ya que se requiere gran anticipación debido a la gran cantidad de problemas que ocasionan.
- Las líneas de categoría II, III, IV pasarán directamente al comité de supervisión. Como comentamos antes, para analizar ciertas líneas o ciertos casos (análisis dinámico por ejemplo) se requiere de una gran experiencia. Además existen casos a estudiar que requieren información de la que no dispondremos hasta más adelante, como pueden ser los desplazamientos que sufren las toberas de los equipos a los que nos conectamos (las proporciona el fabricante del equipo). Lo que haremos en este comité será realizar el análisis de tres de los casos

necesarios: análisis de cargas sostenidas, de dilataciones y condiciones de operación. Así como decidir una configuración de los soportes provisional hasta que el grupo de soportes realice la ingeniería de detalle. Estos análisis son suficientes para determinar si una línea posee el diseño adecuado o es candidata a tener que diseñarse de nuevo. Con esto conseguimos detectar rápidamente aquellas líneas que ni siquiera cumplen con estos dos primeros análisis, pudiendo devolver las isométricas a diseño para su modificación sin tenerlas en espera de análisis y contándolas como diseñadas. El resto de casos a estudiar los realizará el grupo de stress. También enviaremos las isométricas estudiadas por el comité al grupo de soportes para que validen los soportes provisionales colocados y añadan aquellos que consideren necesarios. Con este cambio podemos detectar gran parte de los problemas de diseño a tiempo evitando males mayores como podría ser la compra de material. Además este comité no requiere de analistas con una dilatada experiencia, los cuales son realmente costosos, sino que podemos tener personal del mismo departamento de diseño o incluso se podría plantear un paso necesario por dicho comité para todos aquellos profesionales que quieran convertirse en analistas de flexibilidad pero carezcan de experiencia.

- El resto del proceso seguiría como el actual, pero con estos cambios hemos ampliado el rango de estudio y acortado el tiempo en el que se realizan dichos análisis.

El nuevo comité de supervisión se encargará de las siguientes tareas:

- Realizar un análisis de cargas sostenidas de los sistemas de tuberías de categoría II,III y cuando sea necesario también la categoría IV. Verificando que no existan excesivos esfuerzos en las toberas de los equipos o en tramos del diseño.
- Realizar un análisis de las dilataciones que sufren nuestras líneas al estar en operación. Además de verificar que no existan excesivos esfuerzos ni interferencias con otros elementos de la planta. También debemos tener en cuenta los desplazamientos que podemos ocasionar a los equipos a los que nos conectamos.
- Colocación de soportes provisionales que hagan que los sistemas analizados cumplan con la normativa pertinente ante los dos casos nombrados anteriormente.
- En caso de encontrar inconsistencias en el diseño o zonas críticas donde existe falta de flexibilidad o elevados esfuerzos, realizará los comentarios oportunos y devolverá la isométrica a diseño para que acometa los cambios necesarios.
- Opcionalmente, podríamos establecer que nuestro comité realizase un “flow-check” a las líneas analizadas. Un “Flow-check” consiste en verificar que toda la información que aparece en los diagramas de proceso e instrumentación



aparece correctamente en las isométricas y en nuestra planta: los tipos de válvulas son los correctos, existen todos los instrumentos necesarios, no nos faltan componentes, los sentidos de flujo son correctos así como las temperaturas de diseño y operación....

El comité de validación servirá de conexión entre los distintos grupos dentro del departamento de tuberías y facilitará la comunicación entre ellos. Con esto conseguiremos optimizar el trabajo y tiempo de ingeniería así como mejorar la estimación de tiempos de ejecución y el estado real del proyecto.



6. Caso práctico: Labores del comité de validación

Una vez hemos analizado la problemática actual, vamos a simular cómo actuaría nuestro comité en un caso particular de análisis de una línea.

Nuestro punto de partida serán los planos isométricos que nos llegarán desde el departamento de diseño, aunque necesitaremos más herramientas para poder llevar a cabo nuestra labor:

- Diagrama de procesos correspondiente: Aquí podríamos verificar que todos los elementos de dicha línea están modelados y además podemos comprobar que los sentidos de flujo son correctos. También podremos comprobar si los tipos de válvula son los correspondientes.
- Maqueta 3D: Es imprescindible tener un contacto visual con la maqueta para poder situar la línea y entender su trazado. También resulta importante visualizar posibles elementos donde nos sería fácil soportar la línea. Esto es especialmente interesante para que el pre-soportado de la línea sea realizable y poder utilizar posibles estructuras existentes y no tener que crear unas específicas, lo que aumentaría costes. También necesitaremos la maqueta para buscar alternativas en caso de que necesitemos modificar el trazado.
- Lista de líneas: Nos será de gran ayuda a la hora de verificar que tanto las condiciones de operación y de diseño (Temperatura y Presión) son las correctas.

Para poder realizar el análisis de flexibilidad haremos uso del software “Caepipe”. Se trata de una potente herramienta que nos permitirá diseñar y analizar los diferentes supuestos a estudiar. Una vez realizado el análisis, podremos decidir si es viable o no, actuando en consecuencia según cada caso.

6.1. ANÁLISIS DE UNA LINEA DE INTERCONEXIÓN ENTRE INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Para nuestro ejemplo analizaremos una línea de 12” de interconexión entre 3 intercambiadores de calor. El punto de partida serán las isométricas recibidas del grupo de diseño. Es importante tener en cuenta que nuestra línea nunca vendrá en un único plano isométrico. Es práctica habitual dividir la líneas en diferentes isométricas según una numeración establecida para facilitar su manejo. Dicha numeración se asocia a las diferentes zonas por las que pasa nuestra línea, por ejemplo, de 50-80 son líneas que van por el rack de tuberías.

Una vez recibidos los planos a analizar, la metodología será la siguiente:

- Modelado de la líneas con el software “Caepipe”. El diseño con este software se realiza a través de nodos, por lo que es importante realizar un número considerable de ellos para aumentar nuestra precisión y poder trabajar con mayor cantidad de información.
- Introducción de las condiciones del análisis: Material de la tubería, secciones, cargas a las que está sometido: Presión y Temperatura así como los pesos de los componentes correspondientes.
- Las conexiones a equipos las modelaremos como “apoyos” con todos los grados de libertad impedidos. Esto no sería estrictamente “correcto”, ya que las conexiones a equipos en ocasiones sufren pequeños desplazamientos debidos a las dilataciones pero no impactan en exceso a nuestro análisis. Además, es el fabricante el responsable de facilitarnos dichas condiciones de contorno y es común que lleguen con retraso. Además, nuestro cometido es realizar un pre-análisis para validar o rechazar el diseño, más adelante será el grupo de stress al realizar el resto de análisis correspondiente quien hará uso de dicha información.

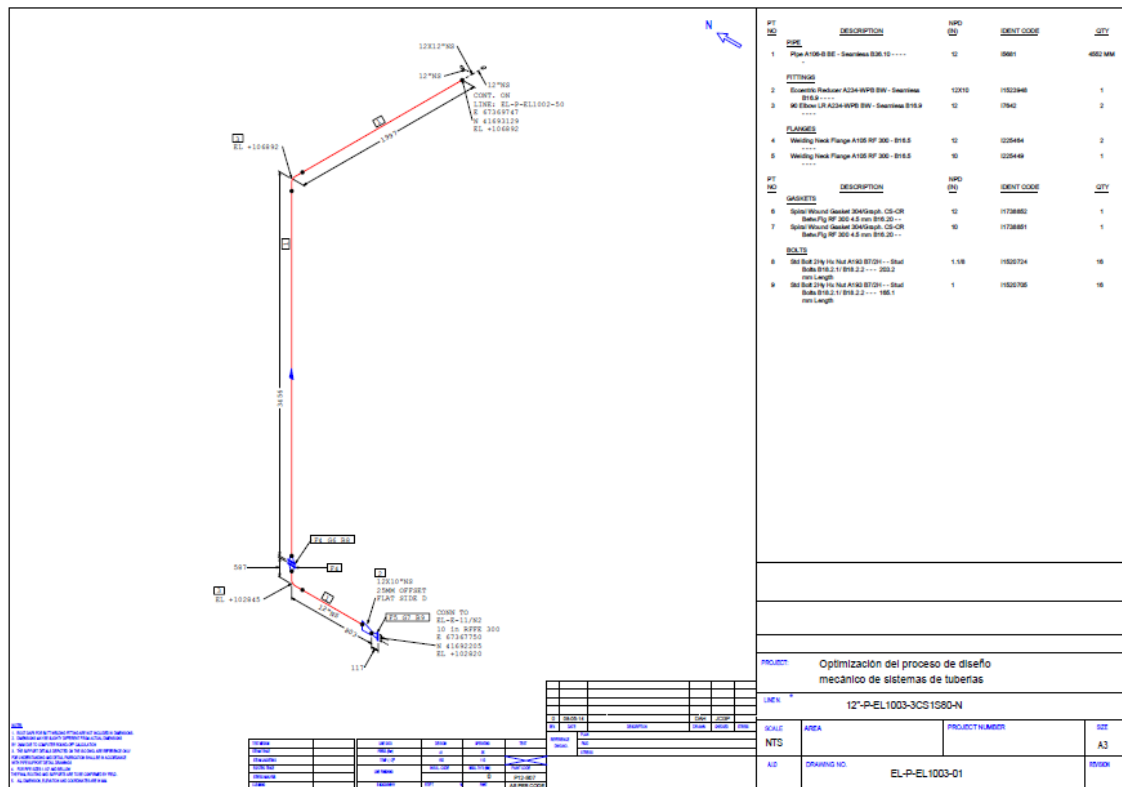


Fig 28 Plano isométrico 2 del caso a estudiar

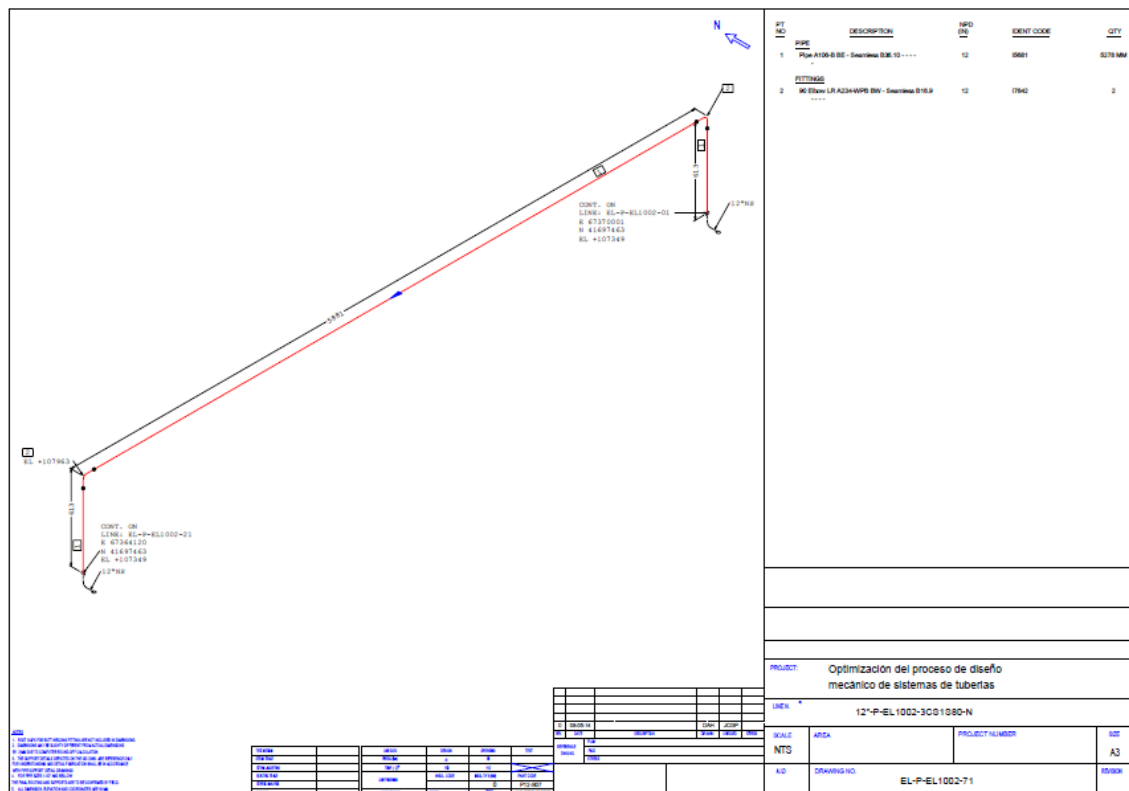


Fig 29 Plano isométrico 3 del caso a estudiar

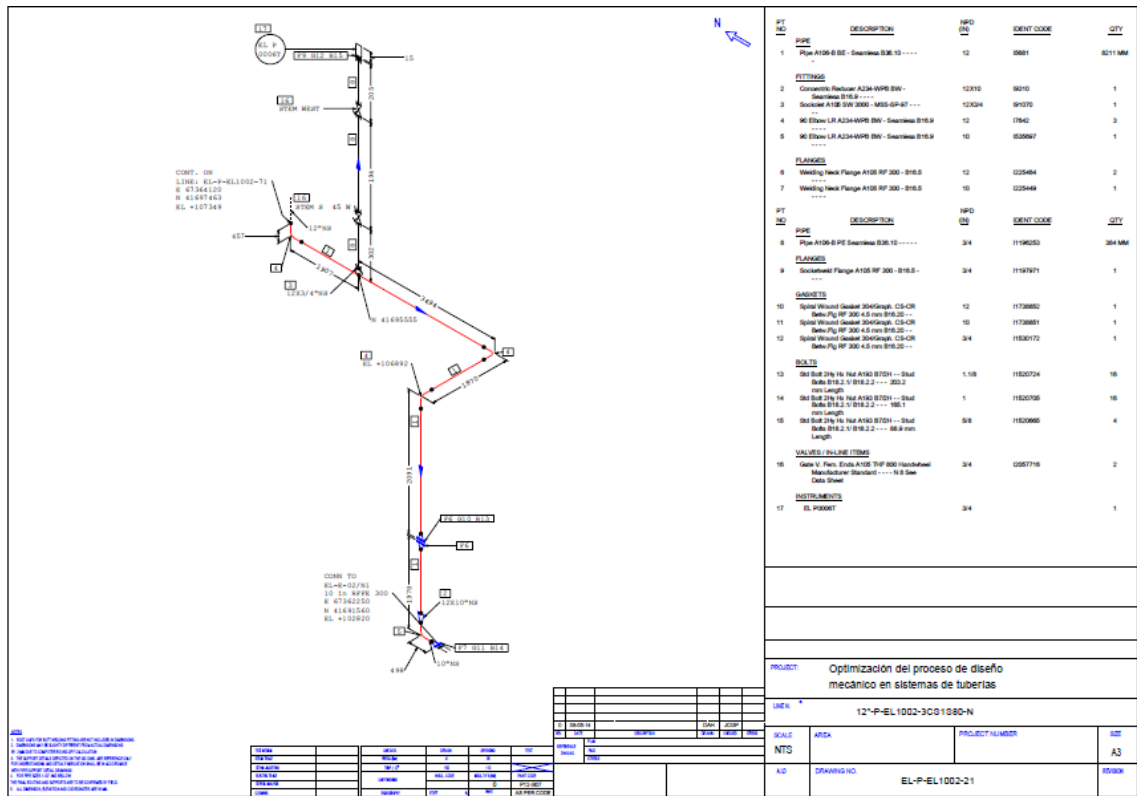


Fig 30 Plano isométrico 4 del caso a estudiar

Una vez recibimos las isométricas, en el cajetín podremos encontrar la información necesaria para nuestro análisis como son las condiciones de presión y temperatura y la especificación a la que pertenece. En nuestro caso se correspondería con:

LINE DATA	DESIGN	OPERATING	TEST
PRESS. (Bar)	41	35	
TEMP. (°C)	150	110	
LINE FINISHING	INSUL. CODE	INSUL. TH'K (MM)	PAINT CODE
		0	P12-S07
RADIOGRAPHY	RT/PT	%	PWHT
			AS PER CODE

Fig 31 Condiciones de diseño de la línea



PROJECT: Optimizacion del proceso de diseño mecanico en sistemas de tuberias			
LINE N. 12"-P-EL1002-3CS1S80-N			
SCALE NTS	AREA	PROJECT NUMBER	SIZE A3
AID	DRAWING NO. EL-P-EL1002-01		REVISION

Fig 32 Información y propiedades de la línea

Una vez sabemos las condiciones de diseño y operación, necesitamos información de la especificación correspondiente a dicha línea, en este caso no encontramos con la especificación “3CS1S80”, que posee las siguientes características:

Spec: 3CS1S80	Date : 05-MAR-13	Revision : 2	Issued : Y
Material	CS	Rating	300
Facing	RF	Corrosion Allowance	1.5 mm
Heat Treatment	As per Code	Design Code	ASME B31.3
Gasket Allowance	3.2 mm		
SERVICE General Process, Winkol			
SERV. LIMITS	51.1 barg	-29 DegC	
	38.9 barg	320 DegC	

Fig 33 Especificación de materiales

Una vez tenemos claros los datos anteriores, debemos ir a la maqueta 3d a localizar dicha línea. En nuestro caso se ha aislado el sistema para una mejor visualización:

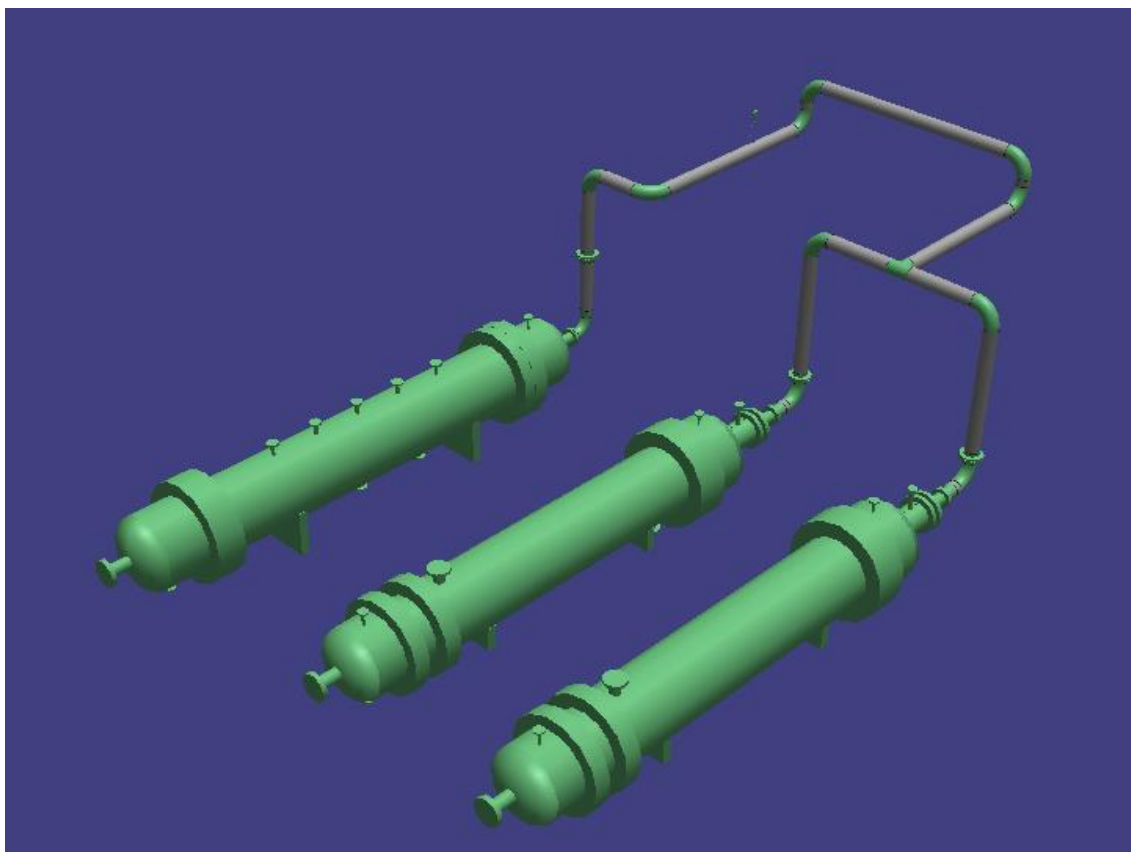


Fig 34 Sistema a analizar en vista isométrica

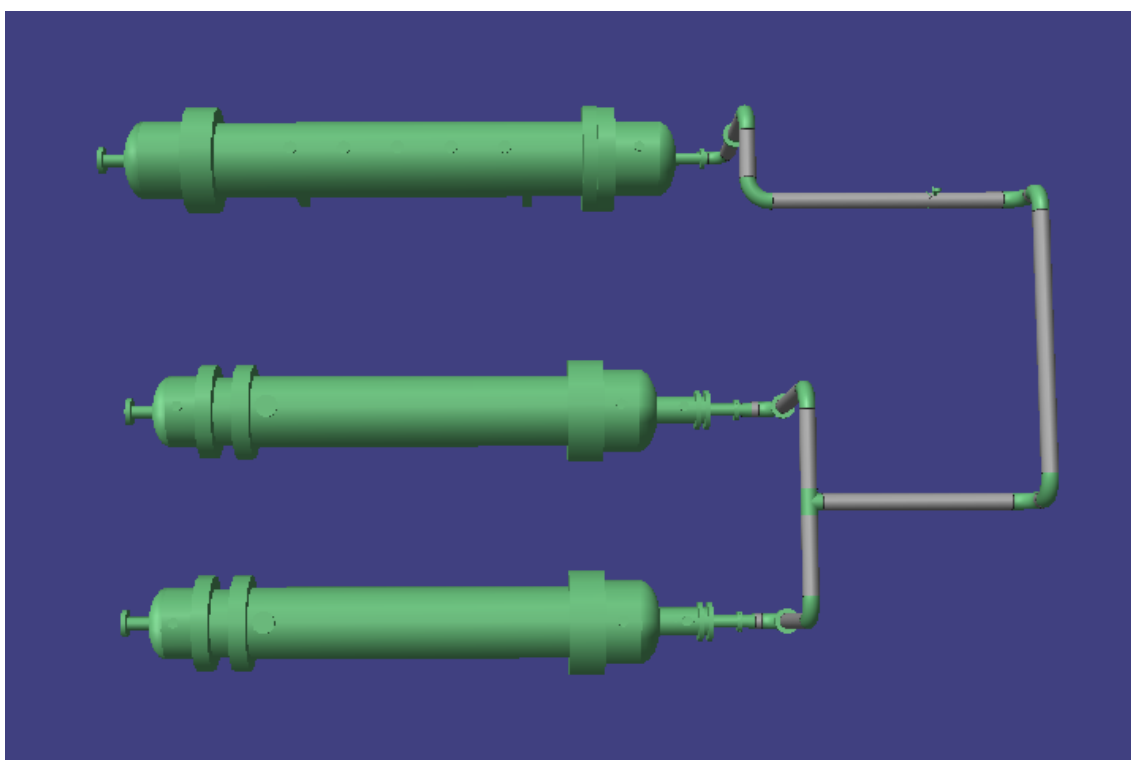


Fig 35 Planta del sistema a analizar



El siguiente paso consiste en modelar nuestro sistema con el software “Caepipe”, herramienta de análisis para sistemas de tuberías. Debemos plasmar las dimensiones indicadas en los planos isométricos pero teniendo en cuenta que al ser una herramienta que trabaja por nodos, debemos establecer suficientes de manera que nos permita interactuar con más libertad con el sistema. El diseño con esta herramienta requiere que definamos el material, que en nuestro caso se trata de un acero al carbono A106 Grado B con las siguientes propiedades:

#	Name	Description	Type	Density (kg/m3)	Nu	Joint factor	Yield (MPa)	#	Temp (C)	E (MPa)	Alpha (mm/mm/C)	Allowable (MPa)
1	A106B	A106 Grade B	CS	7833	0.3	1.00	241.3	1	-28.89	205946	10.55E-6	137.9
2								2	37.78	202016	11.03E-6	137.9
								3	93.33	198569	11.48E-6	137.9
								4	148.9	195122	11.88E-6	137.9
								5	204.4	190985	12.28E-6	137.2
								6	260	188227	12.64E-6	131.0
								7	315.6	184090	13.01E-6	123.4
								8	343.3	179953	13.19E-6	119.3
								9	371.1	175816	13.39E-6	115.1
								10	398.9	171335	13.57E-6	95.84
								11	426.7	166853	13.77E-6	78.60
								12	454.4	160648	13.95E-6	59.98
								13	482.2	154443	14.11E-6	40.68
								14	510	147548	14.24E-6	27.58
								15	537.8	140653	14.35E-6	17.24
								16	565.6	132379	14.49E-6	11.03
								17	593.3	124106	14.62E-6	6.895

Fig 36 Propiedades del acero A-106 B

También es necesario definir las cargas a las que está sometido el sistema:

#	Name	T1 (C)	P1 (bar)	Specific gravity	Add.Wgt. (kg/m)	Wind Load
1	DES	150	41.0	0.9		
2	OP	110	35.0	0.9		
3						

Fig 37 Condiciones de diseño y operación

Es vital conocer la gravedad específica del fluido, tomando como valor 1 la del agua. En nuestro caso es 0.9. Este dato es utilizado para cuantificar el peso total del sistema “lleno” de fluido.

Nuestro sistema modelado queda de la siguiente manera:

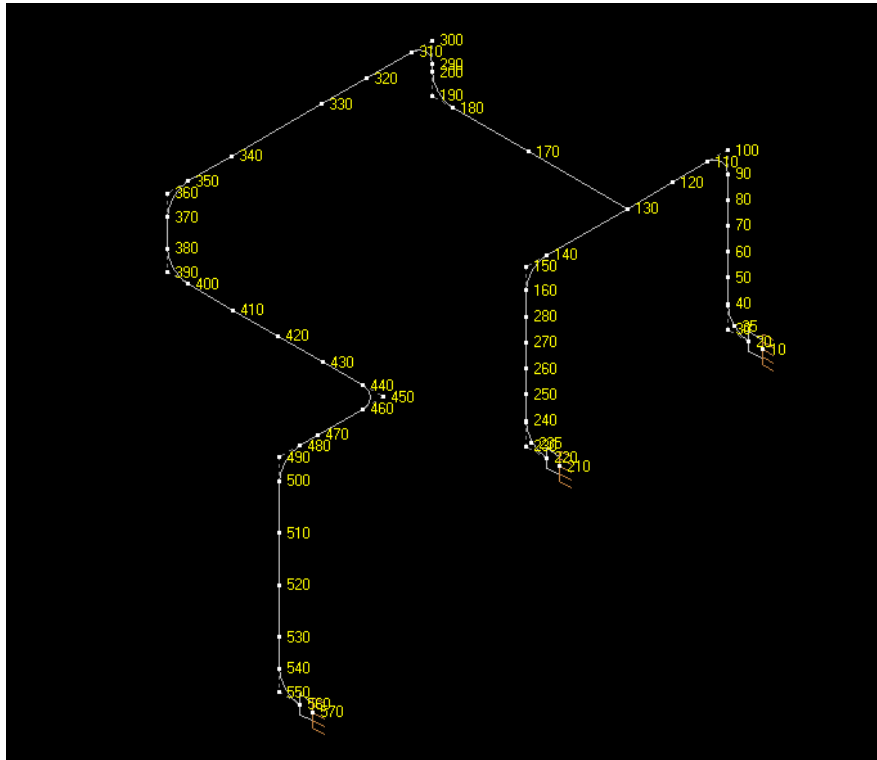


Fig 38 Sistema modelado en Caepipe por nodos

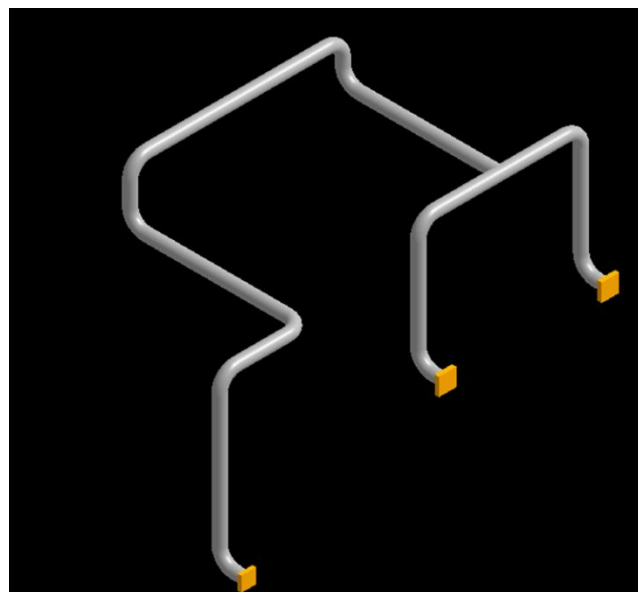


Fig 39 Sistema modelado en Caepipe

Para poder iniciar el análisis debemos posicionar una serie de soportes que permitan mantener el peso propio del sistema y además controlen las dilataciones térmicas

existentes. Esta labor se realizará según el criterio de la persona que realiza el análisis aunque debemos seguir una serie de máximas. Una de ellas sería evitar que las conexiones a equipos sufran grandes cargas, ya que puede ocasionar fallos en el sistema a medio-largo plazo. Nuestra selección de soportes tendrá en cuenta este fenómeno y también utilizaremos el rack de tuberías como apoyo. Utilizaremos en el codo de salida de cada una de las conexiones a equipos unas restricciones verticales que nos permitan soportar la mayor parte del peso y evitar grandes desplazamientos en las toberas. Colocaremos también unos apoyos en el rack, quedando el sistema de la siguiente manera:

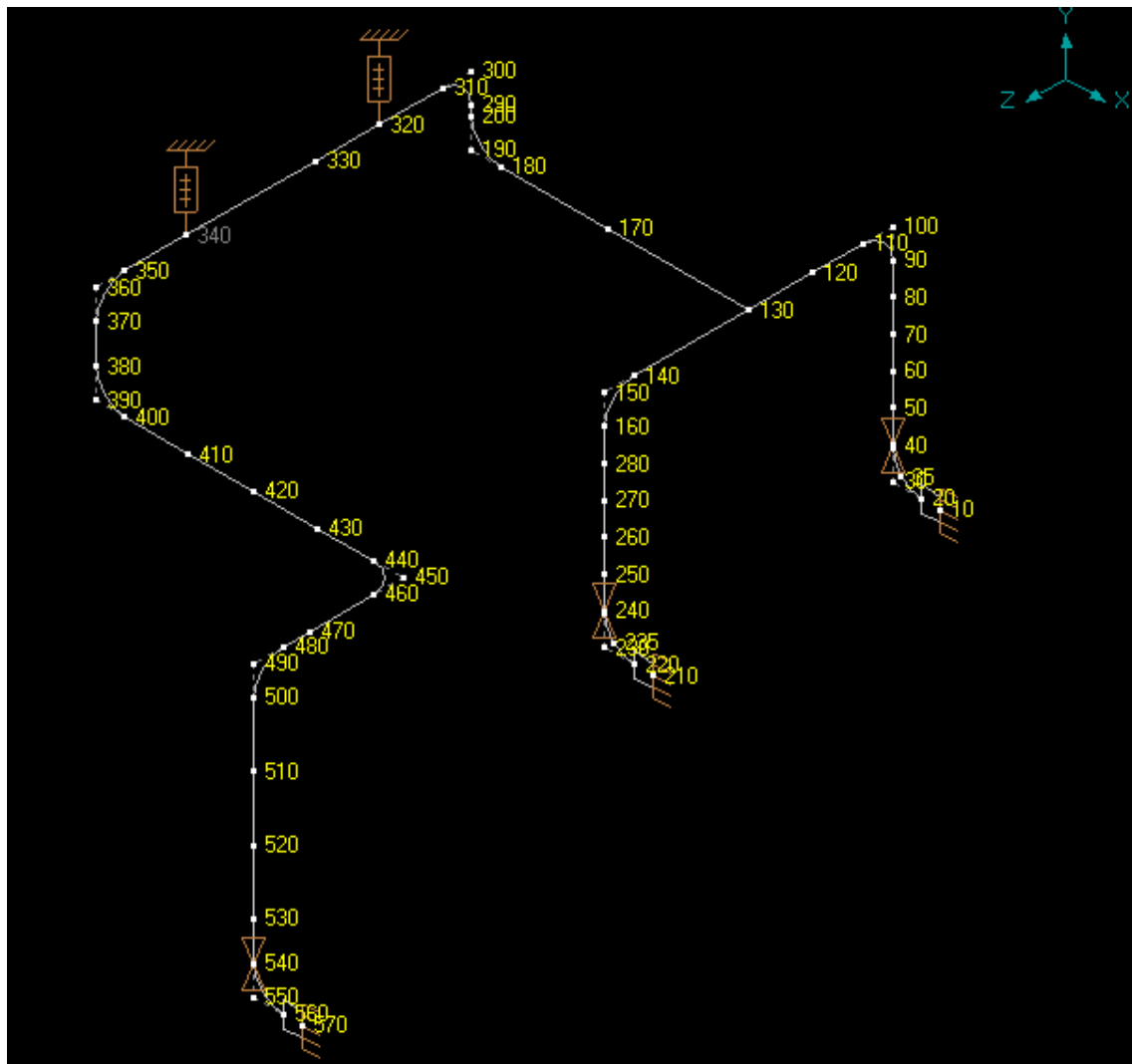


Fig 40 Soportado del sistema,caso1

A priori no conoceremos el número ni tipo de soportes necesarios para validar nuestro sistema, debemos realizar un análisis previo para conocer su comportamiento y poder actuar antes grandes desplazamientos o esfuerzos.



Vamos a proceder a realizar el primer análisis y ver cuáles son los resultados. El primer resultado obtenido se trata de los esfuerzos a los que está sometido el sistema:

#	Sustained				Expansion			
	Node	SL (MPa)	SH (MPa)	SL SH	Node	SE (MPa)	SA (MPa)	SE SA
1	490B	43.71	137.9	0.32	10	42.19	181.4	0.23
2	360B	40.15	137.9	0.29	30A	42.00	181.4	0.23
3	390A	39.35	137.9	0.29	230A	40.34	181.4	0.22
4	490A	38.43	137.9	0.28	550B	38.02	181.4	0.21
5	130	38.36	137.9	0.28	570	37.94	181.4	0.21
6	320	37.91	137.9	0.27	210	37.00	181.4	0.20
7	550A	37.63	137.9	0.27	235	18.27	181.4	0.10
8	340	37.47	137.9	0.27	20	17.79	181.4	0.10
9	500	36.79	137.9	0.27	35	16.68	181.4	0.09
10	450B	36.65	137.9	0.27	220	16.62	181.4	0.09
11	330	35.92	137.9	0.26	560	15.42	181.4	0.09
12	380	35.90	137.9	0.26	30B	15.03	181.4	0.08
13	510	35.90	137.9	0.26	230B	12.02	181.4	0.07
14	190A	35.59	137.9	0.26	100B	10.73	181.4	0.06
15	370	35.55	137.9	0.26	550A	10.59	181.4	0.06
16	420	35.50	137.9	0.26	150A	8.514	181.4	0.05
17	520	35.01	137.9	0.25	40	8.471	181.4	0.05
18	450A	34.96	137.9	0.25	360A	8.219	181.4	0.05
19	430	34.95	137.9	0.25	100A	7.265	181.4	0.04
20	170	34.38	137.9	0.25	240	6.715	181.4	0.04
21	480	34.35	137.9	0.25	390B	6.529	181.4	0.04
22	120	34.33	137.9	0.25	130	5.968	181.4	0.03
23	410	34.32	137.9	0.25	360B	4.888	181.4	0.03

Fig 41 Esfuerzos por cargas sostenidas y por expansión

Caepipe nos muestra en orden descendente los esfuerzos por carga sostenida y expansión, “SL” y “SE” respectivamente y nos los compara con los admisibles según norma “SH” y “SA”. Estos valores variarán en función de la norma, en nuestro caso se aplica el código ASME B31.3. También utiliza un código de colores para reflejar los distintos niveles de stress en cada zona del sistema. Es recomendable que nuestros esfuerzos no superen el 75% del admitido por norma por motivos de seguridad y para poder garantizar un funcionamiento adecuado durante el mayor periodo de tiempo posible. Podemos observar que en nuestro caso el valor más elevado está en torno al 30% del admisible, por lo tanto, sería válido.

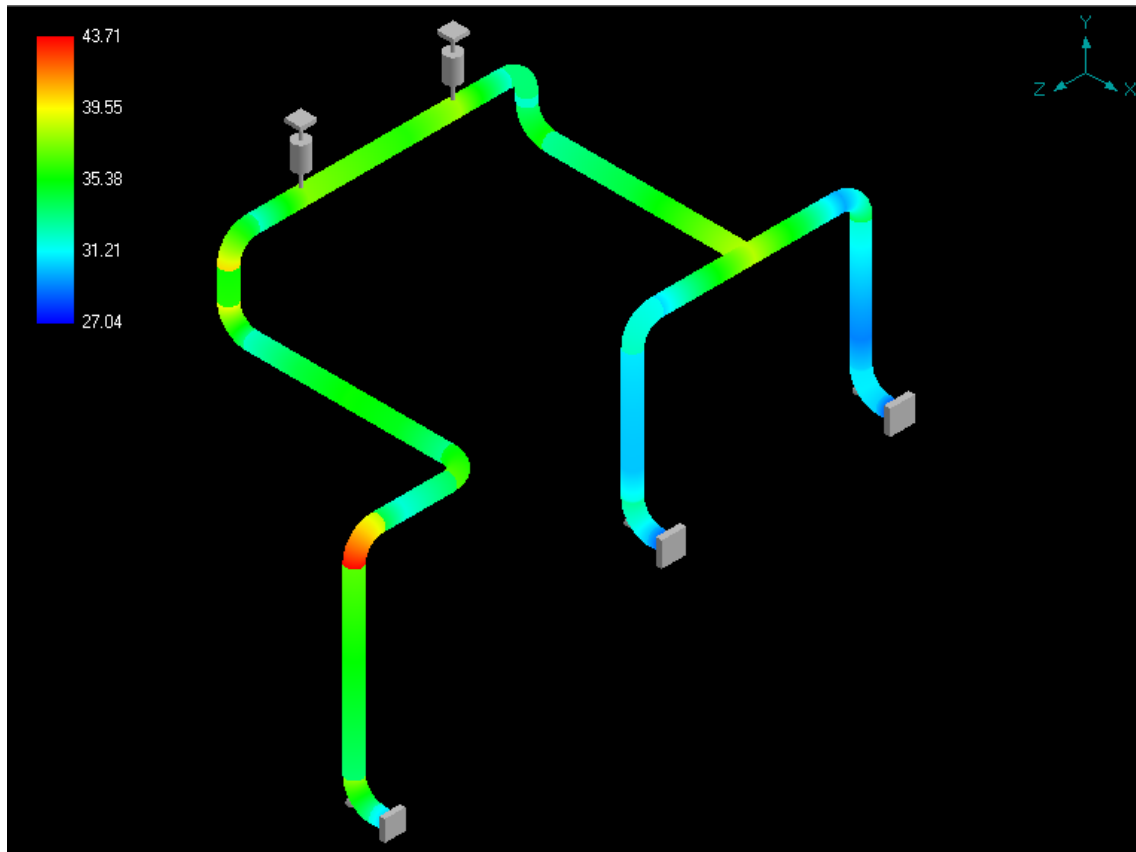


Fig 42 Código de colores de esfuerzos

A continuación debemos revisar cuales son los desplazamientos que sufre nuestro sistema. Existen ciertos límites de desplazamiento que no deben superarse y dependen del proyecto a realizar y de las exigencias del cliente. Para este proyecto consideraremos unos desplazamientos admisibles de entre 10-15 mm. Nuestro sistema se comporta de la siguiente manera:

- Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas: Observamos que una parte del sistema es estable con desplazamientos relativamente pequeños pero tenemos otra zona con desplazamientos algo más elevados. En concreto nos encontramos con el nodo 450A con un desplazamiento de 5,074 mm en dirección (-Y). Estaría dentro de los límites impuestos. Se adjuntará un informe completo en el anexo de este proyecto para facilitar el seguimiento completo.

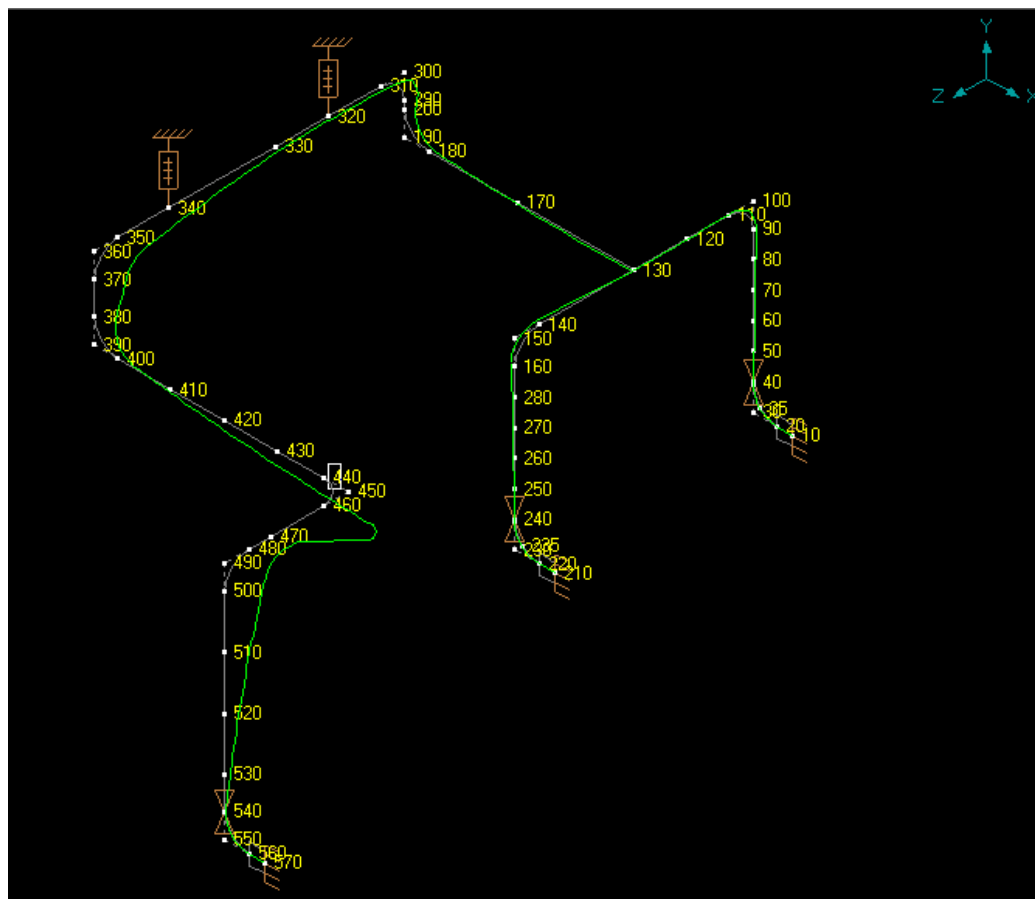


Fig 43 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
41	330	0.633	0.180	-1.443	-0.0049	0.0151	-0.0507
42	340	1.273	0.000	-1.443	0.0163	0.0217	-0.0577
43	350	1.667	-0.355	-1.444	0.0213	0.0251	-0.0610
44	360A	1.667	-0.355	-1.444	0.0213	0.0251	-0.0610
45	360B	1.418	-0.452	-1.453	-0.0165	0.0336	-0.0643
46	370	1.418	-0.452	-1.453	-0.0165	0.0336	-0.0643
47	380	0.721	-0.453	-1.249	-0.0221	0.0365	-0.0659
48	390A	0.721	-0.453	-1.249	-0.0221	0.0365	-0.0659
49	390B	0.159	-1.032	-1.199	-0.0509	0.0320	-0.0722
50	400	0.159	-1.032	-1.199	-0.0509	0.0320	-0.0722
51	410	0.159	-2.269	-1.782	-0.0641	0.0344	-0.0678
52	420	0.159	-3.387	-2.396	-0.0773	0.0355	-0.0595
53	430	0.159	-4.345	-3.016	-0.0906	0.0352	-0.0506
54	440	0.159	-5.074	-3.553	-0.1023	0.0338	-0.0448
55	450A	0.159	-5.074	-3.553	-0.1023	0.0338	-0.0448
56	450B	0.353	-4.368	-3.781	-0.1365	0.0185	-0.0187
57	460	0.353	-4.368	-3.781	-0.1366	0.0185	-0.0187
58	470	0.653	-1.939	-3.782	-0.1389	0.0159	-0.0167
59	480	0.763	-0.939	-3.782	-0.1368	0.0148	-0.0159
60	490A	0.763	-0.939	-3.782	-0.1368	0.0148	-0.0159
61	490B	0.726	-0.016	-3.017	-0.0675	0.0088	-0.0143
62	500	0.726	-0.016	-3.017	-0.0675	0.0088	-0.0143

Fig 44 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas-1

- Desplazamientos debidos a la dilatación térmica: Ahora podemos observar desplazamientos más altos, cerca de los 15mm. Estarían dentro de nuestros límites pero no son recomendables. Además no es admisible desplazamiento vertical en los apoyos del rack. Esto nos indica que nuestro sistema es muy flexible y probablemente requiera de más puntos de soporte y mayores restricciones.

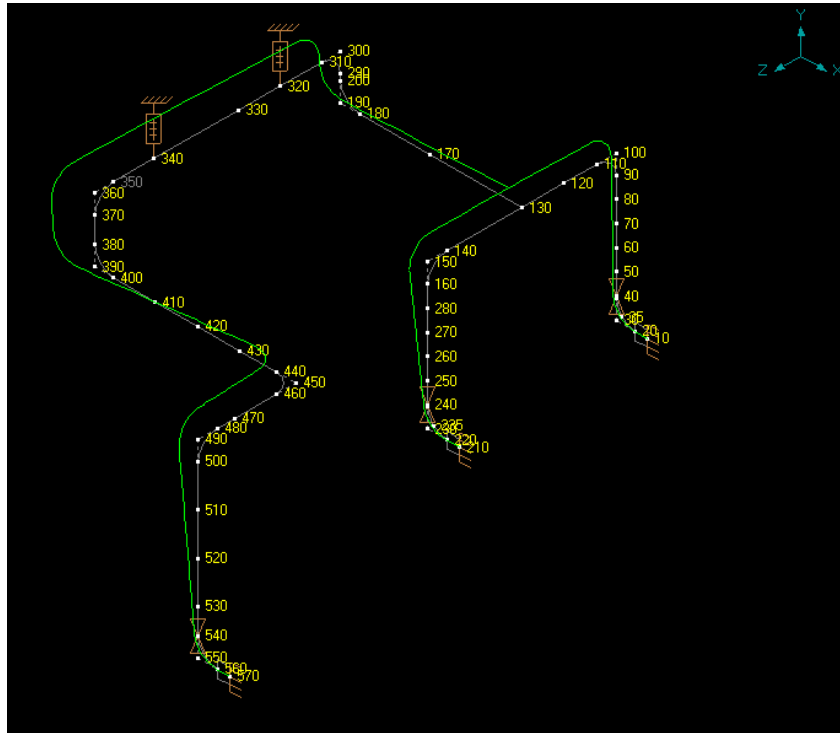


Fig 45 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
37	300A	-10.996	-0.958	-2.650	-0.0144	-0.0331	0.0693
38	300B	-11.792	-0.361	-2.302	-0.0156	-0.0291	0.0670
39	310	-11.792	-0.361	-2.302	-0.0156	-0.0291	0.0670
40	320	-12.288	-0.092	-1.215	-0.0151	-0.0274	0.0664
41	330	-12.747	0.163	-0.127	-0.0140	-0.0249	0.0658
42	340	-13.492	0.594	2.049	-0.0103	-0.0171	0.0646
43	350	-13.739	0.746	3.100	-0.0077	-0.0120	0.0640
44	360A	-13.739	0.746	3.100	-0.0077	-0.0120	0.0640
45	360B	-13.194	0.285	3.543	0.0092	0.0082	0.0730
46	370	-13.194	0.285	3.543	0.0092	0.0082	0.0730
47	380	-12.413	-0.382	3.438	0.0102	0.0131	0.0732
48	390A	-12.413	-0.382	3.438	0.0102	0.0131	0.0732
49	390B	-11.347	-0.249	3.126	0.0225	0.0341	0.0774
50	400	-11.347	-0.249	3.126	0.0225	0.0341	0.0774
51	410	-10.259	1.107	2.488	0.0230	0.0384	0.0778
52	420	-9.171	2.465	1.791	0.0234	0.0409	0.0777
53	430	-8.083	3.818	1.066	0.0238	0.0416	0.0771
54	440	-7.117	5.004	0.427	0.0242	0.0406	0.0760
55	450A	-7.117	5.004	0.427	0.0242	0.0406	0.0760
56	450B	-6.393	5.376	0.613	0.0284	0.0264	0.0701
57	460	-6.393	5.376	0.613	0.0284	0.0264	0.0701

Fig 46 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica-1

- Desplazamientos en condiciones de operación: Cargas sostenidas + térmicas:
Este es el caso más crítico donde combinamos los dos anteriores. Los resultados son similares al caso de cargas térmicas. Además encontramos grandes cargas en las conexiones a los intercambiadores.

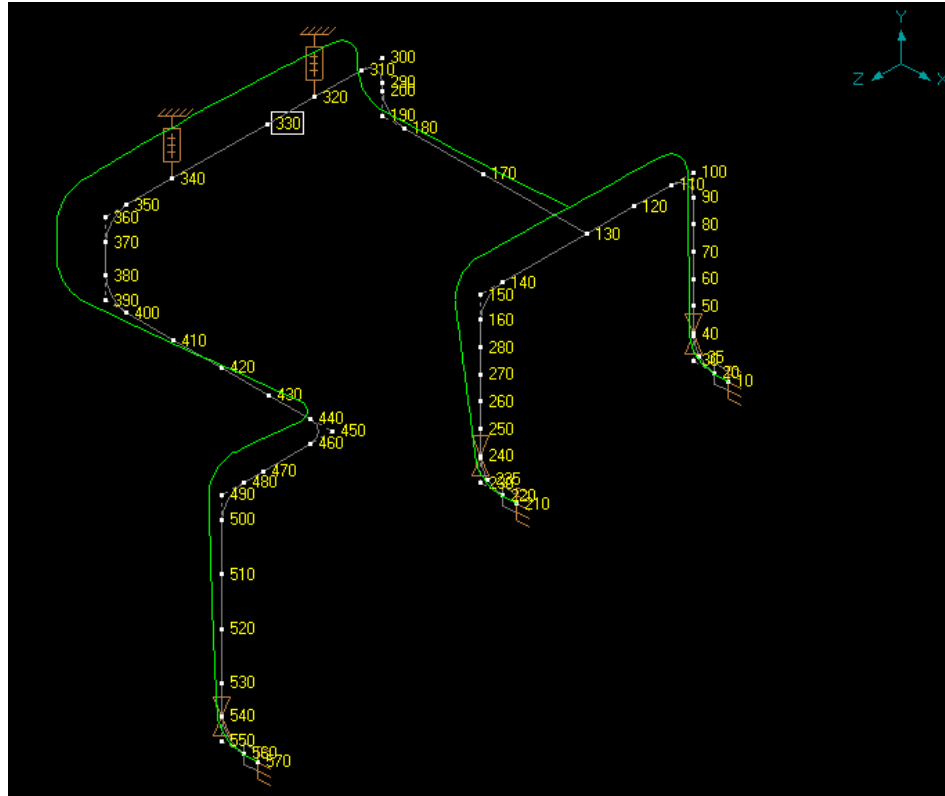


Fig 47 Desplazamientos en condiciones de operación

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
33	190A	-10.148	-1.803	-3.232	-0.0257	-0.0410	0.0594
34	190B	-10.983	-1.735	-3.788	-0.0358	-0.0388	0.0398
35	200	-10.983	-1.735	-3.788	-0.0358	-0.0388	0.0398
36	290	-11.091	-1.565	-3.886	-0.0364	-0.0381	0.0394
37	300A	-11.091	-1.565	-3.886	-0.0364	-0.0381	0.0394
38	300B	-11.578	-0.752	-3.745	-0.0403	-0.0200	0.0232
39	310	-11.578	-0.752	-3.745	-0.0403	-0.0200	0.0232
40	320	-11.890	-0.092	-2.657	-0.0318	-0.0154	0.0191
41	330	-12.113	0.343	-1.570	-0.0189	-0.0098	0.0151
42	340	-12.219	0.594	0.606	0.0060	0.0046	0.0069
43	350	-12.072	0.392	1.656	0.0136	0.0131	0.0030
44	360A	-12.072	0.392	1.656	0.0136	0.0131	0.0030
45	360B	-11.776	-0.167	2.090	-0.0073	0.0418	0.0087
46	370	-11.776	-0.167	2.090	-0.0073	0.0418	0.0087
47	380	-11.692	-0.836	2.189	-0.0118	0.0496	0.0073
48	390A	-11.692	-0.836	2.189	-0.0118	0.0496	0.0073
49	390B	-11.188	-1.282	1.927	-0.0284	0.0661	0.0052
50	400	-11.188	-1.282	1.927	-0.0284	0.0661	0.0052
51	410	-10.099	-1.162	0.706	-0.0412	0.0729	0.0100
52	420	-9.011	-0.921	-0.605	-0.0539	0.0764	0.0182

Fig 48 Desplazamientos en condiciones de operación-1

Una vez analizados todos los casos debemos tomar la decisión de si este diseño es válido y puede pasar a ser aprobado. En caso contrario debemos proponer una posible solución viable y devolver el diseño al grupo correspondiente para que cambien el recorrido de la línea. Normalmente se intenta no modificar el trazado, ya que esto afecta a posible material comprado y además nos obliga a hacer una edición de una línea que ya estaba aprobada. En nuestro caso no necesariamente se debe actuar así. Al modificar el proceso de diseño e introducir un departamento de unión entre grupos, se posibilita la pronta detección de posibles problemas y ello nos permite más margen de actuación. Tenemos la opción de modificar el diseño con el objetivo de corregir trazados sometidos a esfuerzos moderados- altos y conseguir mejorar la vida útil del sistema.

Para el caso práctico que estamos analizando vamos a tratar de soportar de nuevo la línea con más restricciones que el primer caso, y en caso de no satisfacer adecuadamente nuestro objetivo procederemos a proponer un diseño alternativo y remitirle la isométrica al grupo de diseño para que estudie si es viable el nuevo diseño.

La nueva configuración de soportes la configuraremos de la siguiente manera:

- Aprovechando la estructura del rack colocaremos 2 soportes colgantes en los nodos 180 y 400.
- Sustituiremos los apoyos del rack anteriores (que sólo actuaban en dirección vertical) por otro que limite el desplazamiento en las direcciones X, Y.

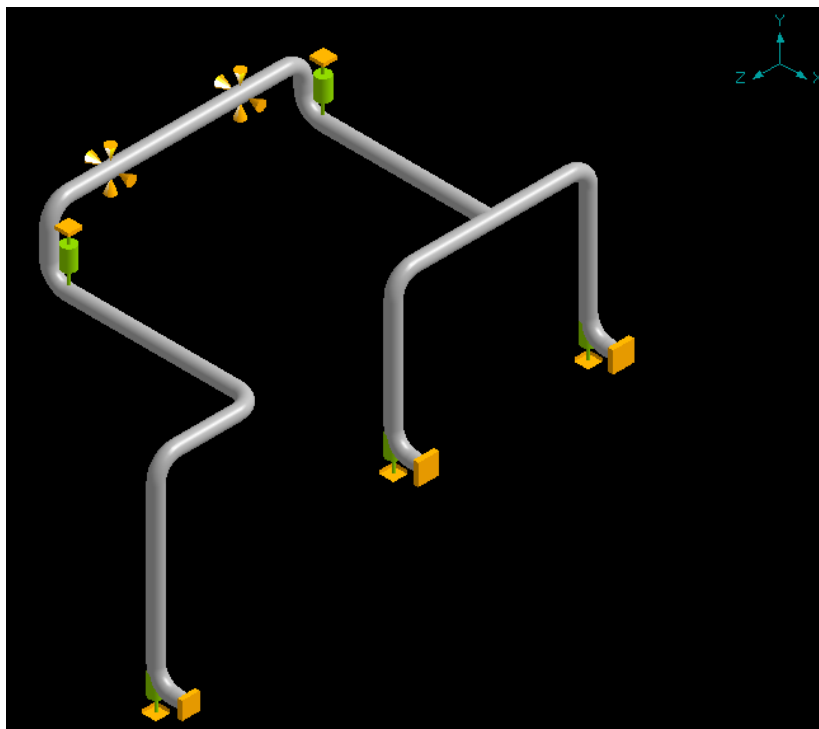


Fig 49 Sistema caepipe opción II

Procedemos a analizar cómo se comporta nuestro nuevo sistema. Primero verificaremos los esfuerzos por carga sostenida y térmica a los que está sometido el sistema:

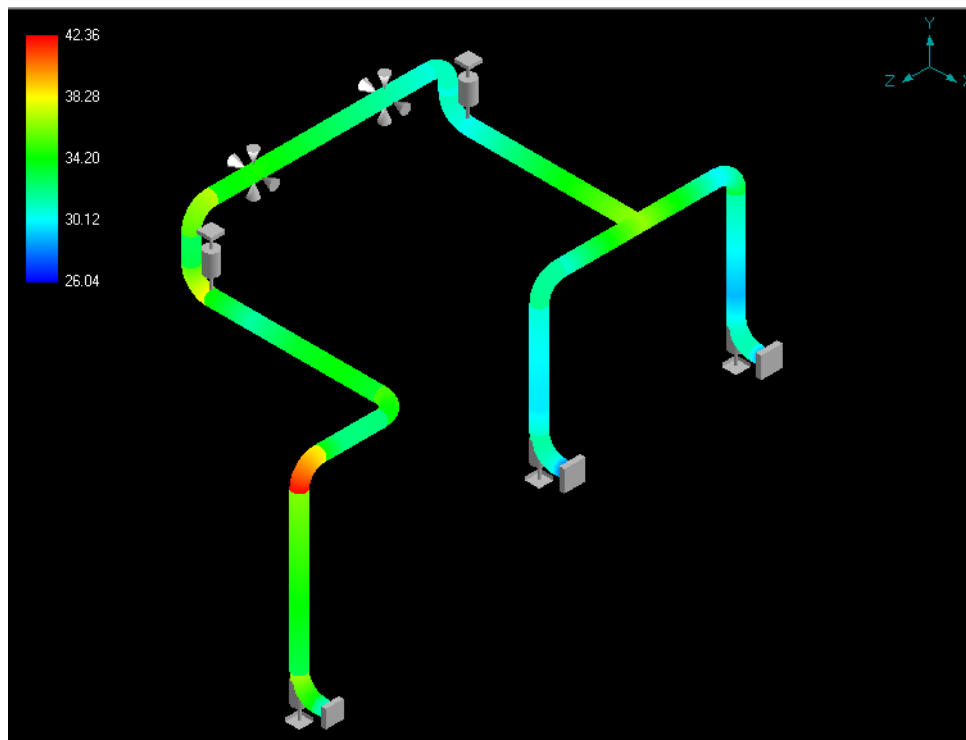


Fig 50 Código de colores sistema opción II

#	Sustained				Expansion			
	Node	SL (MPa)	SH (MPa)	SL SH	Node	SE (MPa)	SA (MPa)	SE SA
1	490B	42.36	137.9	0.31	35	25.55	181.4	0.14
2	390B	38.33	137.9	0.28	30B	24.72	181.4	0.14
3	490A	38.01	137.9	0.28	100A	23.93	181.4	0.13
4	360A	37.25	137.9	0.27	130	22.83	181.4	0.13
5	550A	36.78	137.9	0.27	30A	22.71	181.4	0.13
6	130	36.59	137.9	0.27	450A	22.06	181.4	0.12
7	500	36.24	137.9	0.26	190A	21.90	181.4	0.12
8	390A	35.53	137.9	0.26	490B	20.61	181.4	0.11
9	450A	35.51	137.9	0.26	550A	18.48	181.4	0.10
10	360B	35.35	137.9	0.26	100B	18.22	181.4	0.10
11	510	35.30	137.9	0.26	10	17.63	181.4	0.10
12	400	34.52	137.9	0.25	550B	17.54	181.4	0.10
13	340	34.50	137.9	0.25	150B	17.06	181.4	0.09
14	520	34.40	137.9	0.25	230A	16.78	181.4	0.09
15	430	34.25	137.9	0.25	390B	16.68	181.4	0.09
16	480	34.22	137.9	0.25	235	16.55	181.4	0.09

Fig 51 Esfuerzos por cargas sostenidas y por expansión opción II

Podemos observar que los esfuerzos máximos por cargas sostenidas están en torno al 30% del permitido por norma y los debidos a carga térmica en torno al 15%, por tanto sería correcto. A continuación comprobaremos desplazamientos en cada caso correspondiente:

- Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas: Para este caso, tenemos unos desplazamientos máximos en torno a los 5 mm, que serían admisibles.

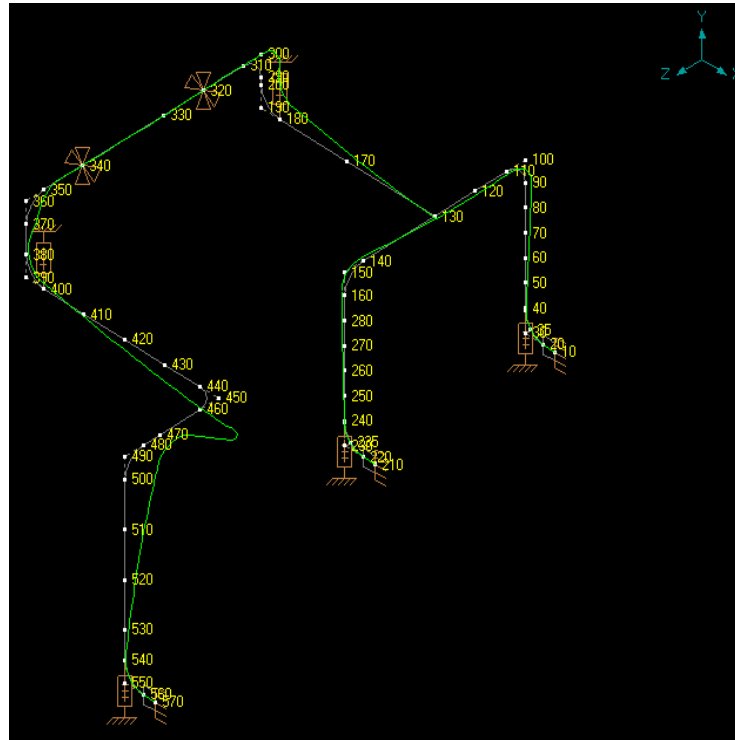


Fig 52 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas opción II

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
45	360B	0.021	0.412	-1.160	-0.0457	0.0240	-0.0374
46	370	0.021	0.412	-1.160	-0.0457	0.0240	-0.0374
47	380	-0.387	0.412	-0.654	-0.0489	0.0273	-0.0390
48	390A	-0.387	0.412	-0.654	-0.0489	0.0273	-0.0390
49	390B	-0.757	-0.014	-0.420	-0.0628	0.0314	-0.0662
50	400	-0.757	-0.014	-0.420	-0.0628	0.0314	-0.0662
51	410	-0.757	-1.214	-0.998	-0.0707	0.0345	-0.0689
52	420	-0.757	-2.395	-1.620	-0.0786	0.0365	-0.0651
53	430	-0.757	-3.474	-2.266	-0.0865	0.0373	-0.0581
54	440	-0.757	-4.322	-2.844	-0.0935	0.0371	-0.0519
55	450A	-0.757	-4.322	-2.844	-0.0935	0.0371	-0.0519
56	450B	-0.494	-3.764	-3.123	-0.1194	0.0295	-0.0246
57	460	-0.494	-3.764	-3.123	-0.1194	0.0295	-0.0246
58	470	0.003	-1.656	-3.123	-0.1201	0.0272	-0.0191
59	480	0.196	-0.793	-3.123	-0.1180	0.0260	-0.0169
60	490A	0.196	-0.793	-3.123	-0.1180	0.0260	-0.0168
61	490B	0.264	0.000	-2.471	-0.0570	0.0208	-0.0086
62	500	0.264	0.000	-2.471	-0.0570	0.0208	-0.0086

Fig 53 Desplazamientos para el caso de cargas sostenidas opción II-1

- Desplazamientos debidos a la dilatación térmica: Podemos observar como con la nueva configuración de soportes hemos conseguido reducir los 15mm de desplazamiento del caso anterior a los 6 mm de este.

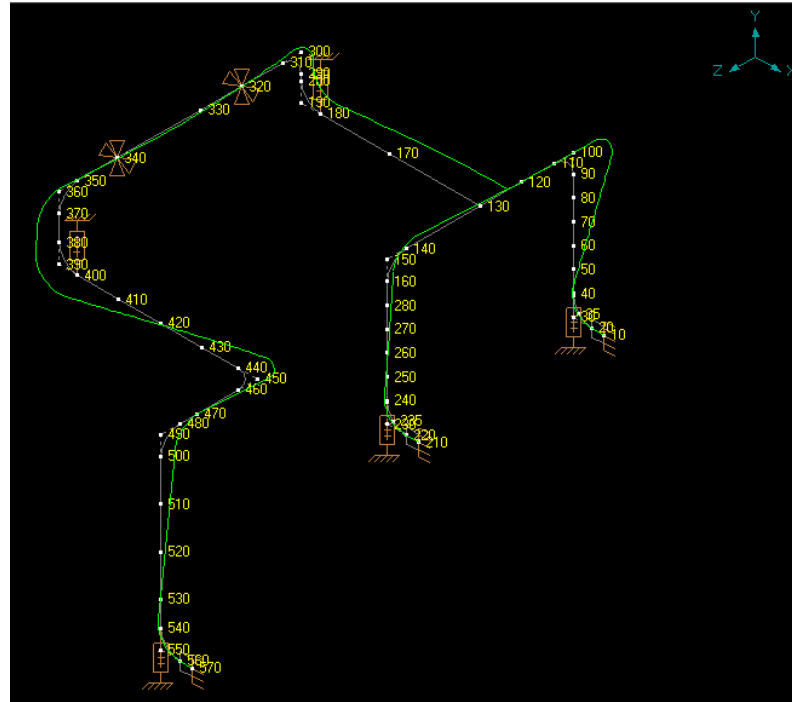


Fig 54 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica opción II

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
45	360B	-0.184	-0.032	3.694	-0.0179	0.0239	0.0015
46	370	-0.184	-0.032	3.694	-0.0179	0.0239	0.0015
47	380	-0.152	-0.698	3.886	-0.0187	0.0311	0.0058
48	390A	-0.152	-0.698	3.886	-0.0187	0.0311	0.0058
49	390B	0.539	-0.811	3.714	-0.0175	0.0529	0.0670
50	400	0.539	-0.811	3.714	-0.0175	0.0529	0.0670
51	410	1.626	0.428	2.735	-0.0235	0.0580	0.0733
52	420	2.713	1.726	1.703	-0.0294	0.0589	0.0736
53	430	3.799	2.975	0.692	-0.0353	0.0557	0.0678
54	440	4.763	3.958	-0.130	-0.0406	0.0494	0.0576
55	450A	4.763	3.958	-0.130	-0.0406	0.0494	0.0576
56	450B	5.341	4.456	0.110	-0.0253	-0.0056	0.0092
57	460	5.341	4.456	0.110	-0.0253	-0.0056	0.0092
58	470	5.187	4.902	1.198	-0.0240	-0.0100	-0.0129
59	480	5.112	5.070	1.647	-0.0218	-0.0098	-0.0220
60	490A	5.112	5.070	1.647	-0.0218	-0.0098	-0.0220
61	490B	4.642	4.641	2.052	0.0260	-0.0241	-0.0693
62	500	4.642	4.641	2.052	0.0260	-0.0241	-0.0693
63	510	3.323	3.554	1.539	0.0315	-0.0177	-0.0798
64	520	1.881	2.467	0.966	0.0329	-0.0112	-0.0834

Fig 55 Desplazamientos debidos a la dilatación térmica opción II-1

- Desplazamientos en condiciones de operación: Cargas sostenidas + térmicas:
Este vuelve a ser el caso más crítico. En nuestro modelo podemos observar que los desplazamientos máximos no superan los 10mm y serían viables.

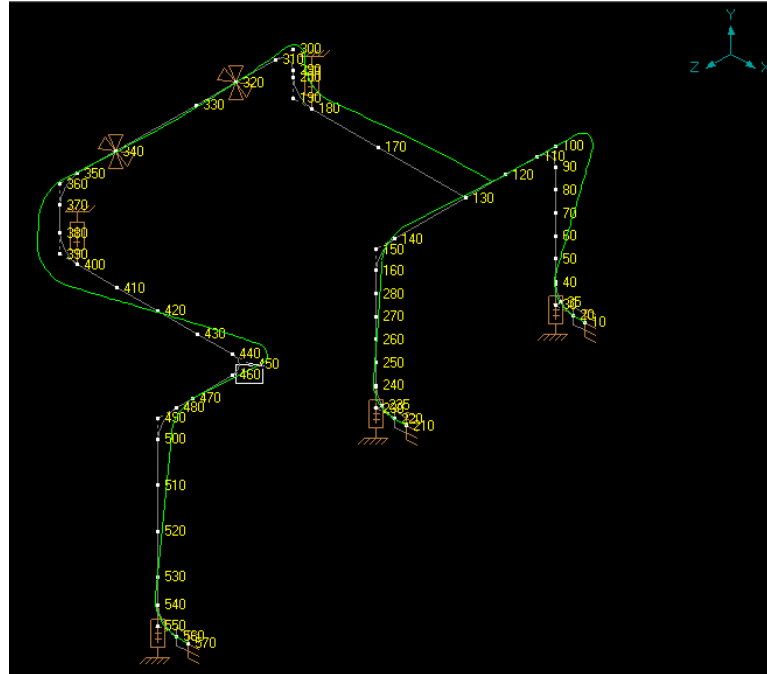


Fig 56 Desplazamientos en condiciones de operación opción II

#	Node	Displacements (global)					
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XX (deg)	YY (deg)	ZZ (deg)
45	360B	-0.184	-0.032	3.694	-0.0179	0.0239	0.0015
46	370	-0.184	-0.032	3.694	-0.0179	0.0239	0.0015
47	380	-0.152	-0.698	3.886	-0.0187	0.0311	0.0058
48	390A	-0.152	-0.698	3.886	-0.0187	0.0311	0.0058
49	390B	0.539	-0.811	3.714	-0.0175	0.0529	0.0670
50	400	0.539	-0.811	3.714	-0.0175	0.0529	0.0670
51	410	1.626	0.428	2.735	-0.0235	0.0580	0.0733
52	420	2.713	1.726	1.703	-0.0294	0.0589	0.0736
53	430	3.799	2.975	0.692	-0.0353	0.0557	0.0678
54	440	4.763	3.958	-0.130	-0.0406	0.0494	0.0576
55	450A	4.763	3.958	-0.130	-0.0406	0.0494	0.0576
56	450B	5.341	4.456	0.110	-0.0253	-0.0056	0.0092
57	460	5.341	4.456	0.110	-0.0253	-0.0056	0.0092
58	470	5.187	4.902	1.198	-0.0240	-0.0100	-0.0129
59	480	5.112	5.070	1.647	-0.0218	-0.0098	-0.0220
60	490A	5.112	5.070	1.647	-0.0218	-0.0098	-0.0220
61	490B	4.642	4.641	2.052	0.0260	-0.0241	-0.0693
62	500	4.642	4.641	2.052	0.0260	-0.0241	-0.0693
63	510	3.323	3.554	1.539	0.0315	-0.0177	-0.0798
64	520	1.881	2.467	0.966	0.0329	-0.0112	-0.0834
65	530	0.436	1.380	0.404	0.0302	-0.0048	-0.0802

Fig 57 Desplazamientos en condiciones de operación opción II-1

Con esta configuración podríamos confirmar que nuestro diseño es viable y podría validarse. Pero debemos hacer una prueba final que sería comprobar si los esfuerzos de las conexiones a equipos están dentro de los permitidos. Para ello debemos consultar la especificación de stress correspondiente al proyecto en cuestión. En nuestro caso lo que debemos cumplir para poder validar el diseño es lo siguiente:

- Comprobación de las cargas en conexiones a equipos: Para nuestro caso debemos cumplir los siguientes requisitos.

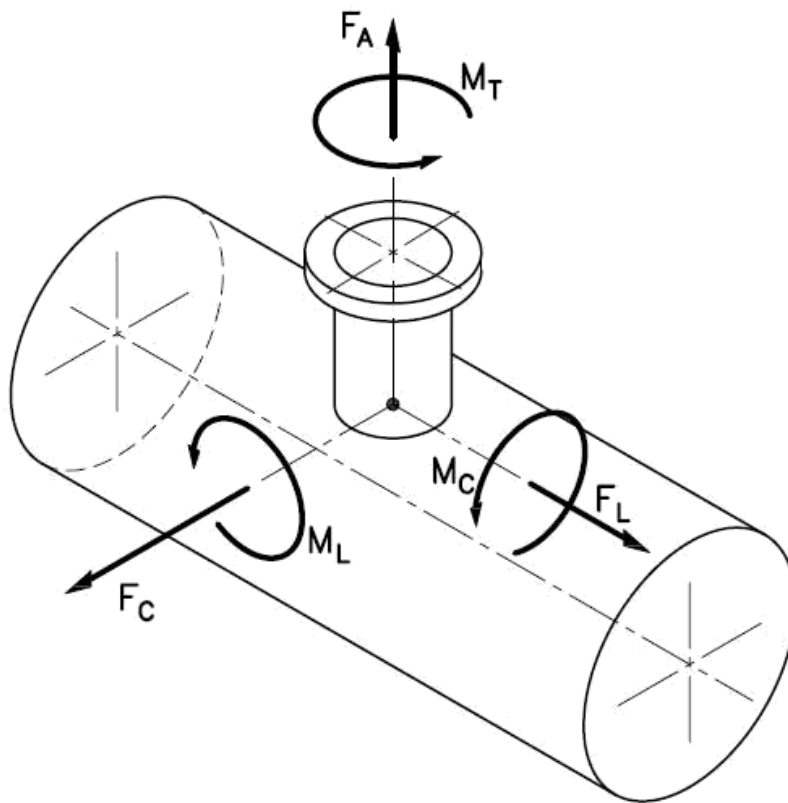


Fig 58 Representación genérica de fuerzas y momentos en intercambiador de calor



TABLE II: ALLOWABLE NOZZLE LOADS FOR VESSEL & HEAT EXCHANGERS		
LOADS AND MOMENTS	LOAD AND MOMENT FACTOR	UNITS
FR- RADIAL LOAD	$K*675*D$	N
FL- LONGITUDINAL LOAD	$K*1000*D$	N
FC- CIRCUMFERENTIAL LOAD	$K*1000*D$	N
MT- TORSIONAL MOMENT	$K*125*D^2$	N*m
ML- LONGITUDINAL MOMENT	$K*100*D^2$	N*m
MC-CIRCUMFERENTIAL MOMENT	$K*75*D^2$	N*m
D= nominal pipe size (NPS) in inches		

Fig 59 Fuerzas máximas en toberas de depósitos e intercambiadores según especificación

FLANGE RATING	K
Class 150#	1
Class 300#	1
Class 600#	1.25
Class 900#	1.25
> Class 900#	1.5

Fig 60 Valor de K para calcular las fuerzas máximas

Para nuestro caso en particular (al ser una conexión horizontal y no vertical), la equivalencia será la siguiente:



FR- RADIAL LOAD	Fy	MT- TORSIONAL MOMENT	Mx
FL- LONGITUDINAL LOAD	Fx	ML- LONGITUDINAL MOMENT	Mz
FC- CIRCUMFERENTIAL LOAD	Fz	MC- CIRCUMFERENTIAL MOMENT	My

Fig 61 Identificación de las fuerzas de nuestro sistema

Por tanto, aplicando lo expuesto anteriormente, tendríamos los siguientes resultados:

TABLE II: ALLOWABLE NOZZLE LOADS FOR VESSEL & HEAT EXCHANGERS		
LOADS AND MOMENTS	LOAD AND MOMENT FACTOR	UNITS
FR- RADIAL LOAD	5750	N
FL- LONGITUDINAL LOAD	10000	N
FC- CIRCUMFERENTIAL LOAD	10000	N
MT- TORSIONAL MOMENT	12500	N*m
ML- LONGITUDINAL MOMENT	10000	N*m
MC-CIRCUMFERENTIAL MOMENT	7500	N*m
D= nominal pipe size (NPS) in inches		

Fig 62 Fuerzas máximas admisibles

Teniendo calculados los valores máximos admisibles, procederemos a verificar para los 3 casos de estudio (cargas sostenidas, dilatación térmica y condiciones de operación) si cumple con lo establecido.

- Cargas en toberas para el caso de cargas sostenidas: Nuestros resultados obtenidos en el análisis son los siguientes:

#	Node	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
1	10	172	-127	-772	-717	-707	-452
2	210	-347	393	304	-94	-5	112
3	570	-419	245	468	-2860	1851	-405

Fig 63 Fuerzas en toberas debidas a cargas sostenidas

Ahora realizamos la comprobación con los máximos admisibles.

Tipo de carga	Cargas admisibles	Conexión nodo 10	Conexión nodo 210	Conexión nodo 570
Fr	5750 N	-127 N	393 N	245 N
Fl	10000 N	172 N	-347 N	-419 N
Fc	10000 N	-772 N	304 N	468 N
Mt	12500 N*m	-717 N	-94 N*m	-2860 N*m
Ml	10000 N*m	-452 N	112 N*m	-405 N*m
Mc	7500 N*m	-717 N	-5 N*m	1851 N*m

Fig 64 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (Cargas sostenidas)



- Cargas en toberas para el caso de dilataciones térmicas: Nuestros resultados y la comparación con los máximos admisibles son:

#	Node	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
1	10	4583	-3386	-3579	-7144	-126	-4561
2	210	3348	-2082	1873	4020	-1755	-3296
3	570	2799	-2569	1706	3798	-753	-3749

Fig 65 Fuerzas en toberas debidas a expansión térmica

Tipo de carga	Cargas admisibles	Conexión nodo 10	Conexión nodo 210	Conexión nodo 570
Fr	5750 N	-3386 N	-2082 N	-2569 N
Fl	10000 N	4583 N	3348 N	2799 N
Fc	10000 N	-3579 N	1873 N	1706 N
Mt	12500 N*m	-7144 N	4020 N*m	3798 N*m
Ml	10000 N*m	-4561 N	-3296 N*m	-3749 N*m
Mc	7500 N*m	-126 N	-1755 N*m	-753 N*m

Fig 66 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (expansión)

- Cargas en toberas para el caso de operación: Los resultados obtenidos son los siguientes:

#	Node	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
1	10	4755	-3513	-4351	-7861	-834	-5013
2	210	3001	-1689	2176	3926	-1760	-3184
3	570	2380	-2324	2175	938	1098	-4154

Fig 67 Fuerzas en toberas en operación

Tipo de carga	Cargas admisibles	Conexión nodo 10	Conexión nodo 210	Conexión nodo 570
Fr	5750 N	-3513 N	-1689 N	-2324 N
Fl	10000 N	4755 N	3001 N	2380 N
Fc	10000 N	-4351 N	2176 N	2175 N
Mt	12500 N*m	-7861 N	3926 N*m	938 N*m
Ml	10000 N*m	-5013 N	-3184 N*m	-4154 N*m
Mc	7500 N*m	-834 N	-1760 N*m	1098 N*m

Fig 68 Comparación de fuerzas en conexiones a equipos frente a admisibles (operación)



A la vista de los resultados, y habiendo superado los análisis por esfuerzos y desplazamientos en el sistema, estaríamos en condiciones de validar la fase de pre-análisis de esta línea. Se procedería a enviar los resultados a los grupos pertinentes.

7. Conclusiones

Es imposible no darse cuenta de cómo ha cambiado el sistema de trabajo en los últimos 10-12 años. Se ha evolucionado y depurado técnicas de trabajo y desarrollo de actividades, pero ciertos aspectos, como puede ser la estructura laboral respecto a dichas actividades, no han evolucionado al nivel que deberían.

En el sector dedicado al diseño y desarrollo de plantas industriales se ha sufrido un gran cambio al que todavía no estamos adaptados completamente, dicho factor es el “tiempo de ejecución y entrega”. Actualmente, para poder optar a conseguir proyectos internacionales, las empresas españolas deben ajustar exageradamente los tiempos de entrega ya que nuestros competidores directos, empresas chinas y coreanas están ajustando mucho los tiempos de entrega en detrimento de la calidad. Por ejemplo, proyectos que antes de desarrollaban en un periodo de 3-4 años ahora debemos finalizarlos en 2, lo que ha provocado que en ciertas labores no seamos eficientes. Uno de los principales problemas es que dicho aumento de carga de trabajo no se ha correspondido con un aumento proporcional de personal cualificado, lo que ha ocasionado un gran aumento de carga de trabajo para los profesionales pertenecientes a este sector y ha hecho imposible seguir realizando ciertas tareas de la manera en la que lo hacíamos hace 20 años. Este proyecto estudia e intenta mejorar un procedimiento, como es la validación de líneas y su soportación, que actualmente no es acorde con los tiempos actuales.

En este proyecto se ha intentado optimizar recursos y adaptarnos al mercado actual. Es realmente difícil cuantificar la mejora que aporta el nuevo método de trabajo que hemos desarrollado, ya que depende de la naturaleza del proyecto. Nuestra metodología está basada en realizar pre-análisis para validar líneas de categorías II, III, IV, pero lo que resulta imposible es saber qué porcentaje del total pertenecen estas categorías. Así si el proyecto a realizar es un “hidro-cracker”, encontraremos muchas líneas de alta presión o categoría I o si se trata de un sistema de transporte de gas el porcentaje variaría considerablemente. Por tanto es imposible sacar un patrón de la cantidad de líneas de cada categoría existentes. Sin embargo vamos a estudiar y cuantificar para un caso concreto el impacto que tendría.

El proyecto a analizar posee las siguientes características:

- Tenemos un total 3429 líneas a modelar.
 - Nuestro proyecto posee 2 unidades separadas, a las que denominaremos A y B.
- La distribución de líneas y categorías sería la siguiente:

	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Unidad A	670	133	143	405
Unidad B	870	397	252	559
Total	1540	530	395	964
% Proyecto	45	15	12	28

Fig 69 Categorización de líneas ejemplo

Como podemos observar, utilizando nuestra propuesta de proceso de diseño, podríamos tener un control más preciso sobre las líneas de categoría II,III,IV que suponen el 55% del proyecto (1.885 líneas). Asumiendo que muchas de ellas serán válidas (como la de nuestro caso práctico), seremos conservadores y supondremos que un 25% de las analizadas sean erróneas. Eso nos lleva a la detección de 471 líneas erróneas o no validables, esto supone un 13% del total del proyecto.



Teniendo en cuenta el caso analizado arriba, podremos mejorar:

- **Control real de avance del proyecto:** En este caso, un 13% de líneas modeladas no pasarían la pre-validación pero al estar ya aprobadas por el diseñador se consideran como avance del proyecto. Estamos incurriendo sistemáticamente en errores de control de proyecto, que con nuestro proceso se solucionaría.
- **Evitar compra de material innecesaria:** Al poder detectar en fase temprana estos errores, evitamos comprar material que no se corresponda con el necesario. Periódicamente se realizan comprobaciones del estado del proyecto y se hacen compras de lo que está modelado en la maqueta, sin saber que en al menos un 13% de los diseños aprobados son erróneos. Por tanto, se estaría comprando el material inadecuado, que con nuestro proceso se solucionaría.
- **Excesivas ediciones de planos isométricos:** Actualmente se producen excesivas revisiones y emisiones de planos, algo que dificulta saber el estado real del proyecto además de dar una mala imagen al cliente. Todas y cada una de las modificaciones realizadas una vez aprobada una línea van reflejadas en las sucesivas ediciones, lo que puede dar lugar a que nuestro cliente dude de nuestra eficiencia y forma de hacer las cosas. Al introducir el comité de supervisión, estas ediciones se reducirían en gran medida.



8. Presupuesto

Los recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto se detallan a continuación:

- Software: Hemos necesitado usar 2 herramientas de trabajo, el software de diseño y edición “Smart Plant 3d” y el software de análisis “Caepipe”
- Personal: Ha sido necesaria la contratación de un proyectista de tuberías y de un ingeniero durante un periodo de 6 meses a media jornada, 3 de ellos utilizados para formación. El proyectista de tuberías fue el encargado de diseñar los casos de estudio, al ser un profesional con experiencia en diseño (aunque no en nuestro software) permite que los casos de estudio sean fieles a la realidad. La labor del ingeniero fue analizar los sistemas diseñados.
- Formación: Curso de 3 meses de duración para formación en el manejo de las herramientas de análisis y diseño, así como nociones generales de stress y soportes.

Coste licencias software	1500 €+2000 €= 3500 €
Cursos de formación (3 meses)	2500 €
Gastos de personal (35€/hora)	35€/h x 80h/mes x 3 meses = 8400€
Total	14400 €





9. Referencias

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 y 2
- M.W. Kellogg Company, 1956. Design of Piping Systems. John Wiley & Sons.
- Peng, L.C and Peng Alvin, 2009. Pipe Stress Engineering. ASME Press
- Berrocal Ortiz, Luis. Resistencia de Materiales. Mc Graw-Hill. Madrid, 1990.
- Timoshenko, Stephen and Gere, James. Mechanics of Materials. Cengage Learning. Fourth Edition.
- Helguero, V. 1985. Piping Stress Handbook. Second Edition. Gulf Publishing Company.
- Nayyar, Mohinder. 2000. Piping Handbook. Seventh Edition. Mc Graw – Hill.
- ASME B31.1 Power Piping
- ASME B31.3 Process Piping
- NEMA SM 23: Steam turbines for mechanical drive service.
- API 560 Fired Heaters for General Refinery System
- API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemicals and Gas Industry Services.



- API 617 Centrifugal Compressors for Petroleum, Chemicals and Gas Service Industries
- API 618 Reciprocating Compressors.
- API 650 Welded Steel Tank for Oil Storage
- API 661 Air-Cooled Heat Exchangers for General Refinery Service.
- API 676 Positive Displacement Pumps-Rotary.
- Ed Bausbacher, Roger Hunt, Process plant layout and piping design; PTR Prentice-Hall 1993



10. Anexos

Los planos anexos así como los análisis completos de los casos de estudio están anexados con hipervínculos con el fin de mejorar la estructura del proyecto.

- Plano isométrico I: [PLANO ISOMETRICO I.pdf](#)
- Plano isométrico II: [PLANO ISOMETRICO II.pdf](#)
- Plano isométrico III: [PLANO ISOMETRICO III.pdf](#)
- Plano isométrico IV: [PLANO ISOMETRICO IV.pdf](#)
- Informe primer caso de estudio: [CASO1-A106B.txt](#)
- Informe segundo caso de estudio: [CASO1B-A106B.txt](#)